

**ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROL PI Y DIFUSO PARA
LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO EN
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EVALUANDO EL VOLTAJE EN ESTADO
TRANSITORIO Y ESTABLE**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
Estudio comparativo de técnicas de control PI y difuso para la estabilidad de tensión
de un inversor trifásico en sistemas fotovoltaicos, evaluando el voltaje en estado
transitorio y estable**

**AUTOR:
ANDRÉ VINICIO MEJÍA PÁLIZ**

**TUTOR:
WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS**

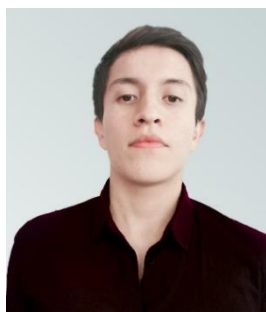
Quito, mayo 2021

André Vinicio Mejía Páliz

ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROL PI Y DIFUSO PARA LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EVALUANDO EL VOLTAJE EN ESTADO TRANSITORIO Y ESTABLE

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto:



André Vinicio Mejía Páliz (Y'1995-D'16). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Experimental de Aviación Civil, se graduó de Físico Matemático. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo de investigación se basa en el estudio comparativo de control PI y difuso para la estabilidad de inversión trifásica de sistemas fotovoltaicos a niveles de media tensión para aplicaciones industriales. amejiap2@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Wilson David Pavón Vallejos (Y'1989). Actualmente es docente a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. Obtuvo su título de tercer nivel en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE como Ingeniero Electrónico en Automatización y Control. Obtuvo su título de cuarto nivel en la Universidad de Newcastle upon Tyne como Magister en Automatización y Control. wpavon@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2021 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Wilson David Pavón Vallejos declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROL PI Y DIFUSO PARA LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EVALUANDO EL VOLTAJE EN ESTADO TRANSITORIO Y ESTABLE* realizado por André Vinicio Mejía Páliz, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito D.M., mayo 2021



.....
Wilson David Pavón Vallejos

CI: 1719224311

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, André Vinicio Mejía Páliz, con documento de identificación N° 1723260269, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROL PI Y DIFUSO PARA LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EVALUANDO EL VOLTAJE EN ESTADO TRANSITORIO Y ESTABLE, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito D.M., mayo 2021



André Vinicio Mejía Páliz

CI: 1723260269

INDICE GENERAL

1.	Introducción.....	2
2.	Marco teórico.....	4
2.1	Estabilidad de voltaje en inversores fotovoltaicos.....	4
2.2	Transformadas de park	4
2.3	Lógica difusa	5
2.4	Controladores PID	5
2.5	Inversor CC/CA.....	6
3.	Planteamiento del problema	6
3.1	Diseño del control PI.....	9
3.2	Diseño del control difuso.....	10
4.	Análisis de resultados	14
4.1	Experimento 1	16
4.2	Experimento 2	18
4.3	Experimento 3	19
5.	Conclusiones.....	21
6.	Trabajos futuros.....	22
7.	Referencias	22
8.	Estado del arte	26

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Inserción de paneles fotovoltaicos autónomos sin causar impactos ambientales.....	3
Figura 2. Estructura de un proceso de lógica difusa.....	5
Figura 3. Inversor IGBT trifásico con fuente CC.....	6
Figura 4. Estructura del sistema fotovoltaico.....	6
Figura 5. Circuito equivalente de un panel PV.....	6
Figura 6. Diseño del control MPPT en un convertidor CC-CC.....	8
Figura 7. Algoritmo Perturbación & Observación (P&O)	8
Figura 8. Lazo de control de corriente	9
Figura 9. Estrategia de control PI para la estabilidad de voltaje a la salida del inversor.....	10
Figura 10. Controlador lógico difuso con 2 entradas (fusificación) y 1 salida (defusificación) de 49 reglas ...	10
Figura 11. Funciones de membresía de las variables de entrada (ed y eq).....	11
Figura 12. Función de membresía de la variable de salida (uC)	11
Figura 13. Superficie 3D de reglas difusas para el control del PWM	12
Figura 14. Estrategia de control difuso para la estabilidad de voltaje a la salida del inversor	12
Figura 15. Diagrama de flujo del estudio comparativo PI y difuso	13
Figura 16. Gráfica V-I del sistema fotovoltaico a irradiancia constante.....	14
Figura 17. Gráfica V-P del sistema fotovoltaico a irradiancia constante	14
Figura 18. Gráfica V-I del sistema fotovoltaico con irradiancia variante.....	15
Figura 19. Gráfica P-V del sistema fotovoltaico a irradiancia variante.....	15
Figura 20. Gráfica V-I del sistema fotovoltaico con temperatura variante	15
Figura 21. Gráfica P-V del sistema fotovoltaico a temperatura variante.....	15
Figura 22. Voltaje de corriente continua entregado por el panel fotovoltaico	16
Figura 23. Control PI en etapa transitoria (Experimento 1)	16
Figura 24. Control Difuso en etapa transitoria (Experimento 1)	16
Figura 25. Control PI en estado estacionario (Experimento 1)	17
Figura 26. Control Difuso en estado estacionario (Experimento 1)	17
Figura 27. Vrms del controlador PI (Experimento 1).....	17
Figura 28. Vrms del controlador difuso (Experimento 1)	17
Figura 29. Control PI en etapa transitoria (Experimento 2)	18
Figura 30. Control PI en etapa transitoria (Experimento 2)	18
Figura 31. Control PI en estado estacionario (Experimento 2)	18
Figura 32. Control Difuso en estado estacionario (Experimento 2)	18
Figura 33. Vrms del controlador PI (Experimento 2).....	19
Figura 34. Vrms del controlador difuso (Experimento 2)	19
Figura 35. Control PI en etapa transitoria (Experimento 3)	20
Figura 36. Control PI en etapa transitoria (Experimento 3)	20
Figura 37. Control PI en estado estacionario (Experimento 3)	20
Figura 38. Control PI en estado estacionario (Experimento 3)	20
Figura 39. Vrms del controlador PI (Experimento 3).....	20
Figura 40. Vrms del controlador difuso (Experimento 3)	21
Figura 41. Resumen e indicador de la temática- Estado del arte.....	31
Figura 42. Indicador de formulación del problema- Estado del arte	32
Figura 43. Indicador de solución - Estado del arte	33

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pseudocódigo del contralador MPPT	8
Tabla 2. Nomenclatura de las variables lingüísticas.....	11
Tabla 3. Reglas difusas para el control del PWM	11
Tabla 4. Pseudocódigo de reglas difusas.....	11
Tabla 5. Especificaciones del módulo fotovoltaico.....	14
Tabla 6. Parámetros del sistema fotovoltaico.....	14
Tabla 7. Puntos de potencia máxima de los experimentos	16
Tabla 8. Variables características de los controladores	17
Tabla 9. Valores característicos del controlador PI (Experimento 1).....	17
Tabla 10. Valores característicos del controlador difuso (Experimento 1)	18
Tabla 11. Valores característicos del controlador PI (Experimento 2).....	19
Tabla 12. Valores característicos del controlador difuso (Experimento 2)	19
Tabla 13. Valores característicos del controlador PI (Experimento 3).....	21
Tabla 14. Valores característicos del controlador difuso (Experimento 3)	21
Tabla 15. <i>Tabla del estado del arte</i>	26

ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROL PI Y DIFUSO PARA LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EVALUANDO EL VOLTAJE EN ESTADO TRANSITORIO Y ESTABLE

Resumen

En el presente artículo se aborda un estudio comparativo de dos métodos de control diferentes implementados para la mejora de la calidad de voltaje a la salida de un inversor CC/CA trifásico fotovoltaico. En el estudio se aplica un control clásico PI y un control heurístico por lógica difusa, los dos de manera independiente controlando el ciclo de trabajo (PWM). Para la comparación de los dos controladores, se ha puesto en consideración tres casos experimentales, en cada uno se ha modificado las condiciones ambientales de temperatura e irradiancia del panel fotovoltaico. Como resultado de la investigación se concluyó que el controlador difuso presenta mejor calidad, debido a que sus valores de error en estado estable están por debajo del 0.133%, por otro lado, sus valores característicos como voltaje pico, tiempo de sobre pico y tiempo de establecimiento, son más favorables ante el control clásico PI. El diseño de los controladores y el sistema se lo ha implementado en el software Matlab-Simulink, apto para el modelamiento de sistemas dinámicos. Finalmente, se recomienda el uso del control difuso por sus ventajas de estabilidad a niveles de media tensión, idóneo para aplicaciones industriales.

Palabras Clave: Fotovoltaica, Control voltaje, Lógica difusa, micro-red, generación.

Abstract

This paper deals with a comparative study of two different control methods implemented to improve the voltage quality at the output of a three-phase photovoltaic DC/AC inverter. The study applies a classical PI control and a heuristic control by fuzzy logic, both independently controlling the duty cycle (PWM). For the comparison of the two controllers, three experimental cases have been considered, in each one the environmental conditions of temperature and irradiance of the photovoltaic panel have been modified. As a result of the investigation it was concluded that the fuzzy controller presents better quality, because its steady state error values are below 0.133%, on the other hand, its characteristic values such as peak voltage, over peak time and settling time, are more favorable than the classical PI control. The design of the controllers and the system has been implemented in Matlab-Simulink software, suitable for modeling dynamic systems. Finally, the use of fuzzy control is recommended for its advantages of stability at medium voltage levels, suitable for industrial applications.

Keywords: Photovoltaic, Voltage control, Fuzzy logic, Stability, micro-grid, generation.

1. Introducción

El mundo, cada vez se encuentra más preocupado por el agotamiento de los combustibles fósiles y de los problemas ambientales causado por la combustión de estos, la aplicación de energías renovables coopera de forma importante a la sostenibilidad del planeta, por el cual claramente, se debe centrar los esfuerzos en mejorar la calidad de las tecnologías limpias, como la generación fotovoltaica y eólica. Los estudios sobre las energías renovables auspiciados por empresas han obtenido una gran atención creciente, a razón de que las energías limpias, necesitan ser prioritarias en las industrias para poder generar impactos a gran escala, y generar conciencia ambiental [1][2]. Las fuentes de energía renovables, específicamente la solar y eólica, se han vuelto más comunes para satisfacer la demanda de consumo de energía eléctrica. Según la agencia internacional de energía, la energía solar habrá proporcionado un 11% de la generación eléctrica a nivel mundial para el año 2050 [3]. Algunas estadísticas, muestran que el consumo de energía solar eléctrica ha aumentado entre un 20% y un 25% anualmente en los últimos 20 años [4].

Los sistemas fotovoltaicos, libres de emisiones son una parte importante en el crecimiento y desarrollo de una red inteligente sostenible. En consecuencia, los sistemas fotovoltaicos, distribuidos han aumentado considerablemente alrededor de todo el mundo, por el cual la integración de este tipo de fuentes de energía, ha resultado un desafío para las empresas de energía eléctrica [5]. Con el rápido crecimiento de la sociedad y la economía, la necesidad de fuentes eléctricas aumenta cada día para satisfacer necesidades de producción y vida [6].

La energía eléctrica tradicional, introduce contaminación ambiental con emisiones de carbono. Para el cual se espera que las futuras redes de bajo voltaje puedan cooperar con altos niveles de energía como la solar fotovoltaica a pequeña escala como se aprecia en la figura 1. Los sistemas fotovoltaicos enlazados a la red se suelen instalar para mejorar el rendimiento de la red eléctrica ya que permite la reducción de pérdidas de potencia y mejora el perfil de la red [3]. Por otro lado, la inserción alta de energía fotovoltaica puede ocasionar varios problemas como: fluctuaciones de voltaje, armónicos, radiaciones, ruido, entre otras. Es por tal razón que la energía eléctrica entregada a la red, deber ser de la mejor calidad posible [7].

La energía solar con el tiempo ha adquirido importancia con sus ventajas como el ser una fuente de energía inagotable, accesible en cualquier parte del mundo, un funcionamiento que implica poco mantenimiento. Este tipo de energía se convierte en electricidad de corriente continua (CC) por medio de los módulos fotovoltaicos (PV). Sabiendo que la mayoría de las cargas son de corriente alterna (CA), es necesario el uso de un inversor el cual convierte el voltaje CC de un sistema fotovoltaico en CA apropiado para una conexión de una red pública o simplemente para una carga [8][9]. En [10] y [11] se pone a disposición una descripción general de los distintos tipos de inversores fotovoltaicos.

Por la eficiencia privilegiada y el tamaño reducido, los inversores fotovoltaicos sin transformadores de aislamiento se vuelven más cotizados en los sistemas solares conectados a la red pública [12][13]. Además, comúnmente no disminuyen la inyección de corriente continua, lo que supone la saturación de los transformadores de distribución en la red eléctrica dando como resultado una



Figura 1. Inserción de paneles fotovoltaicos autónomos sin causar impactos ambientales
[Autor]

mala calidad de la energía, pérdidas y sobrecalentamiento en el sistema eléctrico. Para tales inconvenientes se han formulado estándares y regulaciones para restringir la inyección de corriente continua del inversor al sistema eléctrico [14][15]. Para poder eliminar la saturación de corriente continua, se utiliza un condensador conectado entre el inversor y la fuente. El capacitor implementado instalado debe ser de alta capacidad para poder mitigar el problema [16]. Los inversores de corriente, se utilizan generalmente por la rápida y la alta calidad de corriente suministrada a la red eléctrica, pero su desventaja, es que no pueden funcionar de manera autónoma, porque el voltaje de salida del inversor no suele estar controlado [17]. Obtener una transferencia perfecta es difícil de alcanzar porque se implementan diferentes estrategias de control. En [18] se muestra los distintos modos de control para el diseño de reguladores y controladores en micro-redes (MGs), donde en su gran mayoría se clasifican en sistema centralizado, distribuido, jerárquico e inteligente. Cabe destacar

que las MGs presentan características como alto grado de desequilibrio por el cual imponen grandes desafíos para el diseño de estrategias de control.

Por otro lado, un control clásico o heurístico puede funcionar de manera efectiva ya que el voltaje, está bajo control todo el tiempo [19][20].

En este artículo se presenta la mejora de calidad de voltaje en un sistema de energía solar fotovoltaica por medio del uso de dos controladores PI y lógica difusa. El panel fotovoltaico, está conectado al inversor del lado de la red por medio de un enlace capacitor con carga trifásica.

Las técnicas de control propuestas se utilizarán para ajustar los parámetros en función de los puntos preespecificados, incluidas las transformaciones $dq0$ o transformadas de Park. Los resultados de la simulación de los controles son para mejorar el perfil de voltaje de la salida del inversor [21].

Para estudios de rendimiento y calidad en sistemas fotovoltaicos para metodologías de control como ejemplo para MPPT (seguidor de punto máximo de potencia) o control de voltaje en

inversores fotovoltaicos, se estudian con una irradiación constante y con temperatura variable o viceversa, realizando test experimentales variando dichas condiciones ambientales. El cual permite establecer principios de rendimiento y calidad para el voltaje a la salida del inversor [22].

La presente investigación se encuentra organizado de la siguiente forma: en la sección II se define la estabilidad de tensión en inversores fotovoltaicos y sus controles respectivos. Para la sección III se expresa el planteamiento del problema, el cual consta, del seguidor de punto de potencia máximo aplicado al convertidor CC-CC, incluye también el diseño de los controladores y el diagrama de flujo de solución. En la sección IV se presenta el análisis y resultados de los experimentos realizados a los controladores y para finalizar en la sección V se discute las conclusiones de esta investigación.

2. Marco teórico

2.1 Estabilidad de voltaje en inversores fotovoltaicos

A razón de las propiedades intrínsecas únicas que se componen las micro-redes y las diferencias sistemáticas, realizar un control de voltaje en sistemas de energía convencionales, hace que nos enfrentemos a problemas de estabilidad particulares. La presencia de unidades generadoras en las micro-redes es una ventaja para inyectar potencia reactiva en comparación con los sistemas de energía convencional, el límite de corriente de las unidades fundamentadas en un inversor es un factor importante para la inestabilidad de voltaje en un sistema fotovoltaico [23].

La estabilidad en un inversor fotovoltaico se centra en la mejora de la calidad de voltaje a la salida del inversor CC/CA con las técnicas de linealización, como la transformación en marco

giratorio (transformadas de Park), el modelo por fasores dinámicos, la linealización armónica y el método de orden reducido [24].

2.2 Transformadas de Park

Las señales de corriente Alterna trifásicas se transforman en dos elementos de corriente continua, definidas por las transformadas de Park (transformación dq0), por lo cual es más sencillo y preciso regular dos elementos de corriente continua a diferencia de tratar con componentes de corriente alterna [25][26].

$$T_{\theta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

El inverso de la ecuación (1) es:

$$T_{\theta}^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para el cual el ángulo θ es un ángulo de referencia en el marco de referencia.

$\theta = \omega t$ donde ω es la velocidad de rotación en el marco dq0, t es el tiempo desde la alineación inicial.

La transformación dq0 permite el mapeo de señales trifásicas de un marco de referencia abc a nuevas cantidades en un marco de referencia dq0 giratorio. Denotado como

$$X_{abc} = [X_a, X_b, X_c]^T \quad (3)$$

$$X_{abc} = [X_d, X_q, X_0]^T \quad (4)$$

Donde X representa la cantidad a ser transformada ya sea voltaje, corriente o flujo. La transformación dq0 con respecto al marco de referencia con el ángulo θ se puede definir como $X_{dq0} =$

$T_{\theta}X_{abc}$ donde los índices d, q y 0 representa directo, cuadratura y cero respectivamente [26].

2.3 Lógica difusa

El control por lógica difusa es una de las metodologías más efectivas de la teoría de los conjuntos difusos. La lógica difusa puede modelar el comportamiento humano en términos de inteligencia y sentido en máquinas inteligentes. Al aplicar reglas definidas por el programador en la realización de los procesos del sistema, el control difuso se considera flexible por el cual las reglas se pueden agregar y modificar fácilmente para mejorar el rendimiento del proceso o sistema [27].

Esta metodología de control difusa no necesita de un marco de control complejo, sino que utiliza la compresión humana del sistema en forma de variables lingüísticas normales, por ejemplo: grande, corto, alto, bajo, etc. y se caracterizan por medio de formas lógicas simples (AND, OR, NOT) mediante los conjuntos difusos [28].

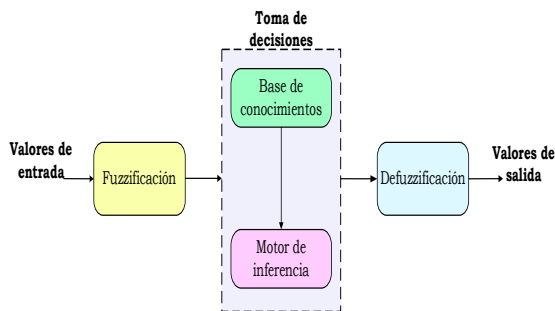


Figura 2. Estructura de un proceso de lógica difusa [Autor]

Los principales elementos que componen como se muestra en la figura 2 en un CLD (control lógico difuso) es la unidad difusa en la terminal de entrada, el conocimiento, motor de inferencia, y el defusificador en el terminal de salida. Un sistema CLD se basa en variables de entrada y salida. Las entradas al controlador difuso son los parámetros o las variables del proceso que se desea controlar, dependiendo muchas veces de las aplicaciones. Generalmente, se

selecciona un error y su tasa de cambio correspondiente para las variables de entrada. Por el cual, el cambio de tensión y corriente se seleccionan como variables de salida [29].

2.4 Controladores PID

Los controladores PI y PID son generalmente empleados en el control de convertidores electrónicos de potencia también son usados en el control de inversores que interactúan con la red eléctrica. Las constantes de los controladores PI y PID usualmente se determinan utilizando distintas metodologías y el modelo matemático del sistema, con métodos tales como Ziegler-Nichols.

Los controladores PID se encuentran en el dominio del tiempo y se implementan en base a la siguiente ecuación [30].

$$F(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, K_i es la ganancia integral y K_d es la ganancia derivativa.

El rendimiento de los controladores puede verse afectados por distintos factores como el ruido. Los inversores interactivos de la red funcionan en un amplio rango de operación y sus parámetros de funcionamiento se ven afectados por condiciones ambientales tales como radiación solar y temperatura [31].

Sabiendo que los inversores de electrónica de potencia presentan un comportamiento no lineal se puede implementar de manera única leyes de control en función del tipo de inversor que el usuario este empleando. La metodología de control convencional PI se aplican a inversores de tipo conmutado, mientras que las metodologías de control lineal como no lineal se pueden aplicar a inversores de tipo promedio. Por tanto, se puede decir

que el comportamiento de los sistemas fotovoltaicos basados en convertidores de electrónica de potencia depende mucho del rendimiento de su estrategia de control [32][33].

2.5 Inversor CC/CA

En un inversor fotovoltaico la corriente continua de entrada es convertida en corriente alterna por el circuito inversor. Para diferentes fuentes de energía renovables, la tensión de la fuente de entrada es generalmente bajo o igual a algún voltaje, dependiendo mayormente de la tensión de suministro de la red eléctrica de salida. Existen distintos tipos de inversores clasificados según el tipo de conmutación y la modulación por ancho del pulso (PWM). Los circuitos inversores llegan a ser excepcionalmente impredecibles dando como resultado un voltaje inestable a la salida del inversor, por lo que el objetivo de una estrategia de control es interferir una parte central de las actividades internas de los inversores[34].

Los inversores compuestos por transistores de tipo IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) son la clave principal de la electrónica de potencia actualmente[35].

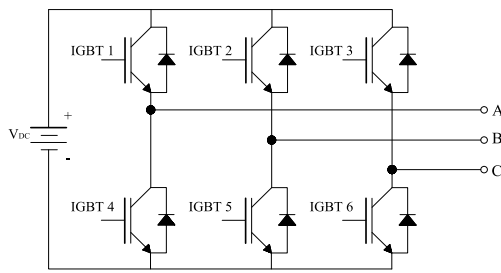


Figura 3. Inversor IGBT trifásico con fuente CC [Autor]

Un inversor trifásico compuesto por seis IGBT como se muestra en la figura 3 se controla por PWM, el pulso de la puerta del inversor estará diseñado dependiendo del voltaje y corriente de referencia de entrada, también dependerá la señal de referencia de salida y del ángulo de fase de referencia [36].

3. Planteamiento del problema

Para llevar a cabo el estudio comparativo de la presente investigación, se desarrollará las estrategias de control respectivas, que permitan mejorar la calidad de voltaje a la salida del inversor. Por lo cual, es importante mencionar puntos preliminares, como la estructura del sistema fotovoltaico con su convertidor CC y el inversor CC/CA, como se detalla en la figura 4.

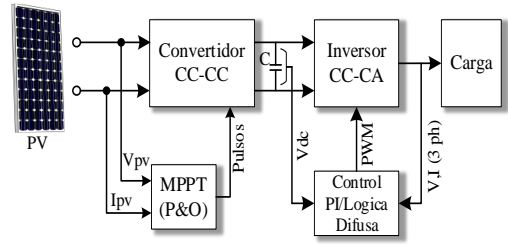


Figura 4. Estructura del sistema fotovoltaico [Autor]

Los paneles fotovoltaicos por medio de la irradiancia y la temperatura entregan voltaje y corriente al convertidor CC-CC. De tal forma que es necesario conocer la energía entregada por el sistema solar. A continuación, se presenta el modelamiento del panel [37], que se fundamenta en el circuito equivalente de un solo diodo como se muestra en la figura 5.

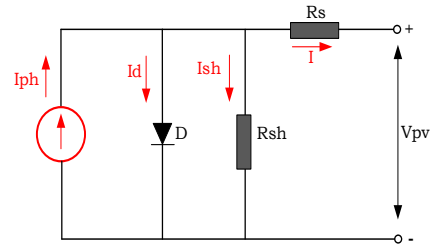


Figura 5. Circuito equivalente de un panel PV [Autor]

Las ecuaciones que representan al modelo del circuito equivalente de un panel fotovoltaico son:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (6)$$

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{\left(\frac{V + R_s I}{n V_t} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (7)$$

$$I_{PH} = \frac{G}{G_{ref}} I_{sc} + k_i (T_c - T_{ref}) \quad (8)$$

$$I_o = \frac{I_{sc} e^{\left(\frac{E_{go} - E_g}{V_{io} - V_i}\right)}}{\left(e^{\left(\frac{V_{oc}}{nN_s V_{io}}\right)} - 1\right)} \left(\frac{T_c}{T_{ref}}\right)^3 \quad (9)$$

$$E_g = E_{go} - \frac{\alpha_{gap} T_c^2}{\beta_{gap} + T_c} \quad (10)$$

$$I_{mg} = I_{pm} \left(\frac{I_{mm}}{1000} G + \left(\frac{dI_{scm}}{dT} \right) (T_c - T_{ref}) \right) \quad (11)$$

$$V_{mg} = N_{sm} \left(N_s V_T \ln \left(1 + \frac{I_{scm} - I_{mm}}{I_{scm}} \left(e^{\frac{V_{scm}}{N_s V_T}} - 1 \right) \right) - I_{mm} R_{sm} \right) \quad (12)$$

$$E_e = \frac{G}{G_{ref}} \quad (13)$$

$$I_{mg} = N_{pm} \left[I_{mpo} (C_o E_e + C_1 E_e^2) (1 + \alpha_{Imp} (T_c - T_{ref})) \right] \quad (14)$$

$$V_{mg} = N_{sm} \left[\frac{V_{mpo}}{V_{mp}} + C_2 N_s \delta(T_c) + C_3 N_s (\delta(T_c) \ln(E_e))^2 \right] + \beta_{Vmp} E_e (T_c - T_{ref}) \quad (15)$$

Donde:

I_o	Corriente de saturación inversa
n	Factor del diodo
R_s	Resistencia en serie
R_{sh}	Resistencia de derivación
I_{ph}	Corriente fotogenerada
G	Valor de irradiancia arbitrario
T_c	Temperatura de las celdas
V_t	Voltaje térmico
G_{ref}	Irradiancia en corriente de cortocircuito
T_{ref}	Temperatura en corriente de cortocircuito
k_i	Coefficiente de temperatura
STC	Corriente de cortocircuito
I_{sc}	Corriente de cortocircuito
V_{oc}	Voltaje en circuito abierto
V_{to}	Tensión térmica en corriente de cortocircuito
E_{go}	Brecha de energía
α_{gap}	Características del semiconductor
β_{gap}	Parámetros del semiconductor
N_s	Paneles en serie
N_{sm}	Módulos fotovoltaicos conectados en serie por arreglo
N_{pm}	Módulos fotovoltaicos conectados en paralelo por arreglo

I_{mg}	Corriente del MPP
V_{mg}	Voltaje del MPP
I_{scm}	Corriente de cortocircuito de los módulos fotovoltaicos del arreglo
V_{ocm}	Voltaje de circuito abierto de los módulos fotovoltaicos del arreglo
E_e	Irradiación normalizada
I_{mpo}	Corriente del MPP en STC del PV
V_{mpo}	Tensión del MPP en STC del PV
α_{Imp}	Coefficiente de temperatura normalizada
q	Carga elemental
k	constante de Boltzmann
β_{Vmp}	Coefficiente de temperatura por modulo en STC

La corriente del panel está dada por la ecuación (6) obtenida de la sumatoria de corrientes en el nodo como se ilustra en la figura 5. Las características I-V de las celdas solares viene dada por una ecuación implícita y no lineal, véase la ecuación (7). En (8) se define la corriente fotogenerada, en cual puede evaluarse para cualquier valor arbitrario de irradiancia, quedando como incógnita la corriente de cortocircuito de la celda fotovoltaica. Recurriendo así a (9) para obtener la corriente de saturación del circuito. Adicional, es importante obtener los valores de energía del semiconductor a distintas temperaturas de la célula definida en (10). Para encontrar los puntos de operación de potencia máxima en un panel (MPP), implica obtener los valores de voltaje y corriente en circuito abierto del arreglo de los paneles solares el cual está representada en (11) y (12). La tensión y corriente en MPP de las celdas queda finalmente definida en (14) y (15).

Conocido el I-V y P-V característico del arreglo, es imprescindible que el sistema extraiga el máximo punto de potencia. Por el cual se diseña un contralor en MPPT.

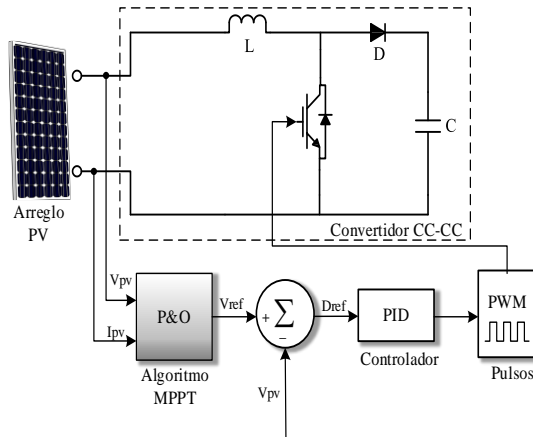


Figura 6. Diseño del control MPPT en un convertidor CC-CC [Autor]

En la figura 6 se precisa el diseño del seguidor de punto de potencia máxima (MPPT), donde el algoritmo de perturbación y observación (P&O) recibe la corriente y voltaje del arreglo fotovoltaico, el cual entrega una referencia al controlador PID para que este a su vez pueda enviar la señal de control al PWM. Cabe recalcar que, si los pulsos incrementan, la tensión del arreglo tendrá que reducirse para ubicar el punto de potencia máxima. Por otro lado, si los pulsos decrementan, la tensión del sistema incrementa para encontrarse en su máximo punto de potencia como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Pseudocódigo del contralador MPPT [Autor]

Pseudocódigo del controlador P&O	
Paso 1: Inicio	
Paso 2: Entradas: $\{V_{pv}, I_{pv}, D_{cycle_n} n = 0, n = n + 1\}$	
Paso 3: Salidas: $\{V_{pv_new}\}$	
Paso 4: Inicialización: Algoritmo_Perturbar&Observar	
Cálculo de la referencia $D_{ref} = V_{ref} - V_{pv}$ Controlador_PID Generar pulsos_PWM	
Paso 5: Proceso: Si: $D_{cycle_n} > D_{cycle_{n-1}}$ Entonces: $V_{pv_new} = V_{pv} + V_{pv_{n-1}}$ Sino: $V_{pv_new} = V_{pv} - V_{pv_{n-1}}$ Fin Si	
Paso 6: Retornar: $\{V_{pv_new}\}$	
Paso 7: Ir a Inicio	

El algoritmo P&O tiene un enfoque iterativo; el cual recibe la corriente y el voltaje del arreglo fotovoltaico, la potencia de salida se calcula como el producto de estos dos parámetros. Su principio de funcionamiento se basa en perturbar, mediante un pequeño incremento, la tensión del terminal del arreglo se compara con la potencia del terminal del sistema con el ciclo de perturbación anterior. Ahora, si la perturbación conduce a un aumento en la potencia del panel, la perturbación subsiguiente se realiza en la misma dirección. De esta manera, el rastreador MPP busca incesantemente la ubicación de máxima potencia como se detalla en la figura 7.

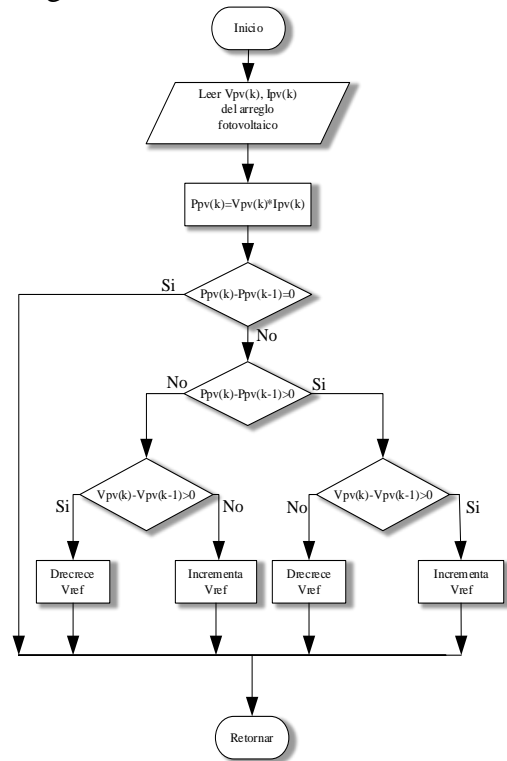


Figura 7. Algoritmo Perturbación & Observación (P&O) [Autor]

Una vez garantizado la potencia máxima del sistema solar, el convertidor CC-CC entrega voltaje de corriente continua al inversor trifásico CC/AC, como se muestra en la figura 4. Para la siguiente etapa se diseñará la estrategia de control PI y lógica difusa, que actuaran sobre el ciclo de trabajo (PWM) del inversor conmutando cada uno de los transistores.

Para el diseño de cada uno de los controladores, se propone el mismo lazo de control de corriente como se muestra en la figura 8. El bucle de bloqueo de fase (PLL), permite la medición del ángulo de fase y la frecuencia de funcionamiento del voltaje del circuito. Entregando los componentes $\sin(\omega t)$ y $\cos(\omega t)$ como los referidos para la transformada abc a dq0. El objetivo principal del lazo es encontrar el voltaje de referencia en eje directo y de cuadratura tanto para el controlador PI como el difuso.

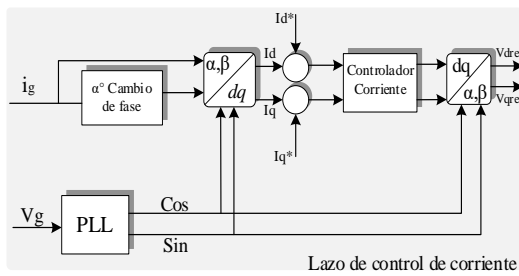


Figura 8. Lazo de control de corriente [Autor]

3.1 Diseño del control PI

Los controladores PI tradicionales se caracterizan por presentar una respuesta lenta, gran error en estado estacionario, baja capacidad de anti-interferencia, dando en ciertos casos una mala calidad en la tensión de salida. El diseño del controlador PI esta expresado en el dominio de tiempo continuo como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_{\tau}^t e(\tau) d\tau \quad (6)$$

Donde:

- $u(t)$ Señal de control
- $e(t)$ Señal de error
- t Variable de tiempo continuo
- τ Variable de cálculo de integración
- K_p Constante de ganancia proporcional
- K_i Constante de ganancia integral

La implementación de este algoritmo utilizando para la estrategia de control requerirá que se lo transforme en el dominio de tiempo discreto. La aproximación de suma trapezoidal se utiliza para transformar el término

integral en el dominio de tiempo discreto, ya que es la técnica más sencilla. El término proporcional se usa directamente sin aproximación.

Término P:

$$K_p e(t) = K_p e(k) \quad (7)$$

Término I:

$$K_i \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau \cong K_i \sum_{i=0}^k \frac{h}{2} [e(i) + e(i-2)] \quad (8)$$

Relación de tiempo:

$$t = k * h \quad (9)$$

Donde:

- h Periodo de muestreo
- k Índice de tiempo discreto:
- $k = 0, 1, 2, \dots$

Con fines de simplificación, es conveniente definir las nuevas ganancias del controlador como:

$$K_i' = K_i \frac{h}{2} \quad (10)$$

Para eliminar la necesidad de calcular la suma total en cada paso de tiempo (lo que requeriría una cantidad de cálculo cada vez mayor a medida que pasa el tiempo), la suma se expresa como una suma acumulada:

$$sum(k) = sum(k-1) + [e(k) + (k-1)] \quad (11)$$

$$u(k) = K_p e(k) + K_i' sum(k) \quad (12)$$

Estas dos ecuaciones representan la estrategia de control PI en tiempo discreto utilizada en la presente investigación.

Para la etapa final de la estrategia de control representado en la figura 9, las variables dq se convierten en señales PWM. La frecuencia de conmutación de los transistores se establece mediante la transformación de los componentes en el marco coordinación abc.

La conmutación de los IGBT ayuda a tener una salida de corriente alterna a la salida del inversor como una onda sinusoidal pura.

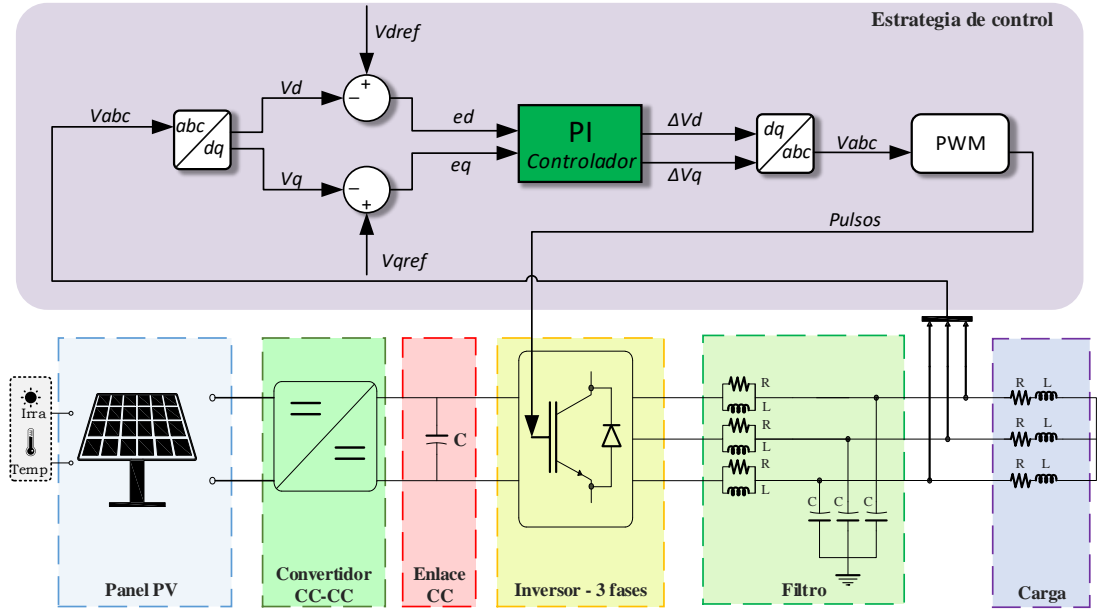


Figura 9. Estrategia de control PI para la estabilidad de voltaje a la salida del inversor [Autor]

3.2 Diseño del control difuso

El control por lógica difusa sobresale entre las técnicas de control más efectivas entre los conjuntos difusos y técnicas asociadas. El algoritmo de lógica difusa es adecuado para el lado de la red de convertidor al filtro RCL con modelos no lineales complejos y variación de parámetros.

$\Delta e_d, \Delta e_q$ para los dos controladores sucesivamente.

Para el control de voltaje, el controlador de lógica difusa tiene tres parámetros. La primera entrada es el error de voltaje, la segunda es la tasa de cambio de error y la salida es el voltaje de referencia que controla el componente de voltaje. Las variables de entrada se calculan en cada instante de muestreo, llamado k .

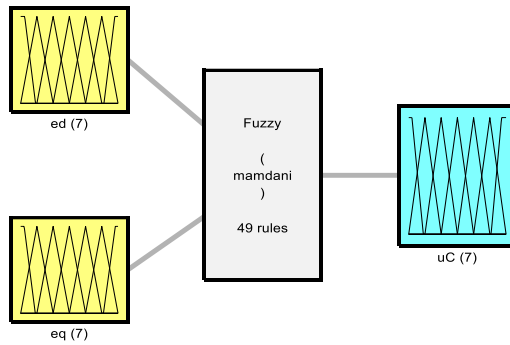


Figura 10. Controlador lógico difuso con 2 entradas (fusificación) y 1 salida (defusificación) de 49 reglas [Autor]

Para el control de voltaje las entradas son V_{dref}, V_{qref} y V_d, V_q y a la salida se tiene

Eje directo:

$$e(k) = v_{dref}(k) - V_d(k) \quad (13)$$

$$\Delta e = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (14)$$

Eje de cuadratura:

$$e(k) = v_{qref}(k) - V_q(k) \quad (15)$$

$$\Delta e = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (16)$$

Donde:

$v_{dref}(k), v_{qref}(k)$ y $v_d(k), v_q(k)$ son respectivamente; la referencia y el voltaje medido en el instante k . En la

etapa de fusificación, las variables $e(k)$ y $\Delta e(k)$ se convierten en variables difusas que pueden identificarse mediante las funciones de pertenencia.

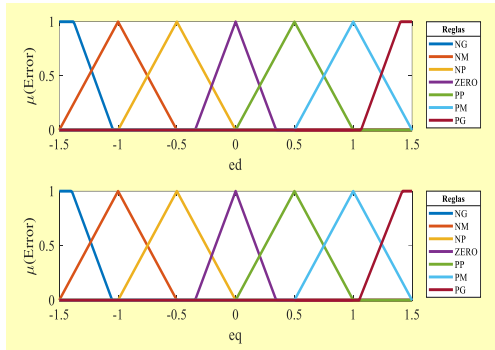


Figura 11. Funciones de membresía de las variables de entrada (ed y eq) [Autor]

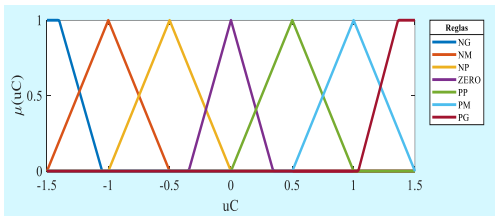


Figura 12. Función de membresía de la variable de salida (uC) [Autor]

La función elegida para las variables lingüísticas NG y PG como se muestra en las figuras 11 y 12, son de tipo trapezoidal y para el resto de las variables se ha implementado funciones tipo triangular.

El controlador propuesto utiliza las siguientes variables lingüísticas.

Tabla 2. Nomenclatura de las variables lingüísticas [Autor]

NG:	<i>Negativo Grande</i>	PP:	<i>Positivo Pequeño</i>
NM:	<i>Negativo Mediano</i>	PM:	<i>Positivo Mediano</i>
NP:	<i>Negativo Pequeño</i>	PG:	<i>Positivo Grande</i>
ZERO:	<i>Cero</i>		

A continuación, se presenta el diseño de las reglas de variables lingüísticas.

Tabla 3. Reglas difusas para el control del PWM [Autor]

Error → Cambio de error ↓	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NM	NM	NP	NP	ZE
NM	NM	NM	NG	NP	NP	ZE	PP
NP	NM	NM	NP	NP	ZE	PP	PP
ZE	NG	NP	NP	ZE	PP	PP	PM
PP	NP	NP	ZE	PP	PP	PM	PM
PM	NP	ZE	PP	PP	PM	PG	PG
PG	ZE	PP	PP	PG	PM	PG	PG

La Tabla 2 muestra la lista de reglas que rigen la decisión del diseño del controlador difuso. A continuación, para la tabla 4 se presenta el algoritmo en funcionamiento del conjunto de reglas difusas.

Tabla 4. Pseudocódigo de reglas difusas [Autor]

Pseudocódigo de reglas difusas

Paso 1: Inicio

Paso 2: Entradas:

{error, CambioDeError}

Paso 3: Salidas: {uC}

Paso 4: Inicialización:

ReglasFuzzy ← []

Paso 5: Asignación de Variables

ReglasFuzzy ← [error, CambioDeError]

Paso 6: Proceso

Si: (error =NG) & (CambioDeError=NG)

Entonces: uC=NG

Si: (error =NM) & (CambioDeError=NG)

Entonces: uC=NG

Si: (error =NP) & (CambioDeError=NG)

Entonces: uC=NM

Si: (error =ZE) & (CambioDeError=NG)

Entonces: uC=NM

Si: (error =PP) & (CambioDeError=NG)

Entonces: uC=NP

Si: (error =PM) & (CambioDeError=NG)

Entonces: uC=NP

Si: (error =PG) & (CambioDeError=NG)

Entonces: uC=NP

...

Si: (error =PG) & (CambioDeError=PG)

Entonces: uC=PG

Paso 7: Retornar: {uC}

Paso 8: Ir a inicio

Para mejor visualización del comportamiento de las reglas de fusificación, se lo ha llevado a un plano tridimensional, el cual permite entender de mejor manera el funcionamiento del controlador. Para el cual, al tener una función de membresía de salida, se

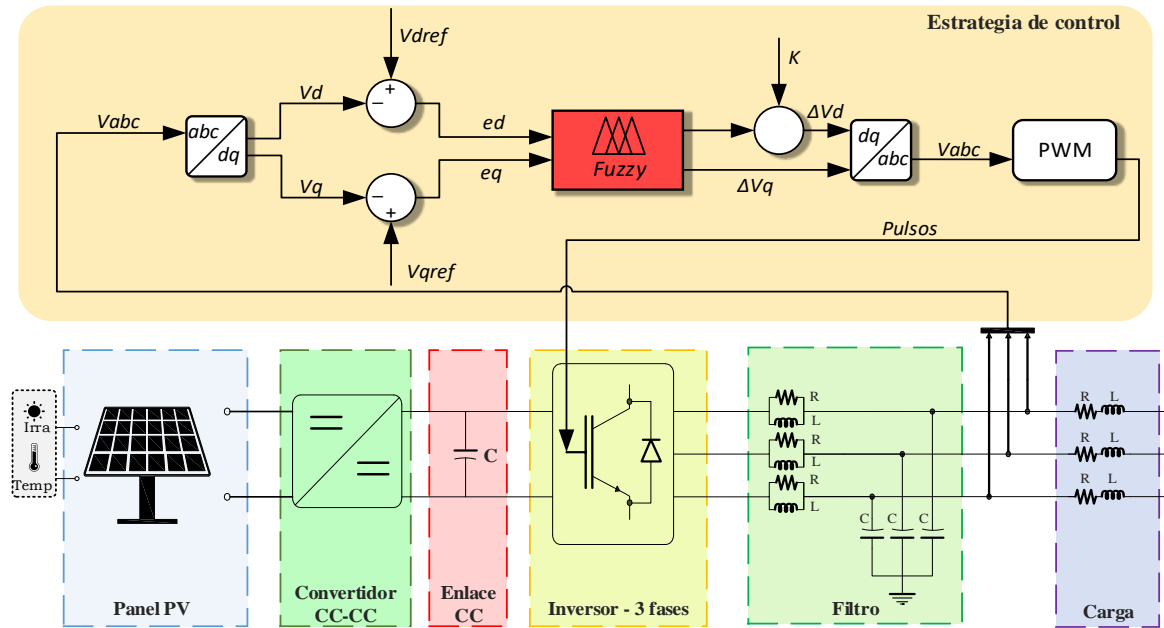


Figura 13. Estrategia de control difuso para la estabilidad de voltaje a la salida del inversor [Autor]

obtiene una superficie dada por las figuras 11 y 12.

La figura 13 indica que, si el error en cuadratura disminuye y el error en eje directo también disminuye, la señal de control debe tomar valores pequeños. Por otro lado, si el error en cuadratura es alto y el error en eje directo es alto también, la señal de control debe tomar valores igualmente altos. Este comportamiento nos permite deducir que si los errores, tanto en cuadratura como en eje directo incrementan, la señal de control deberá aumentar considerablemente.

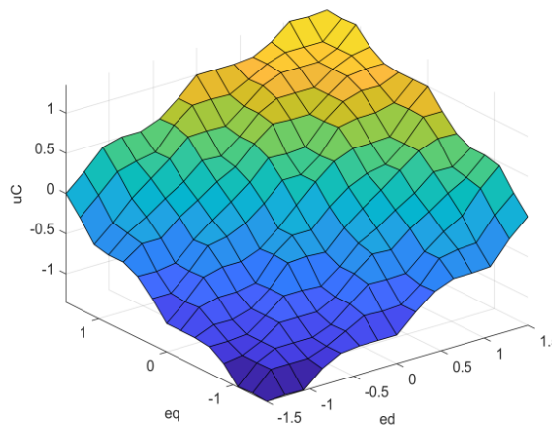


Figura 14. Superficie 3D de reglas difusas para el control del PWM [Autor]

Para la figura 14, se discute el diseño del control difuso, el cual se aplica al inversor trifásico. Transformando los voltajes trifásicos del marco de referencia síncrono (abc) en el marco de referencia estático (dq). En consecuencia, el sistema de coordenadas de dos fases se desarrolla a partir del sistema de coordenadas de tres fases con la frecuencia angular fundamental. En la mayoría de los casos, las variables trifásicas como la corriente suman cero. Por tanto, se omitirán los componentes en secuencia cero del sistema. Una vez, ya conmutado los transistores del inversor, se obtiene a la salida del inversor, la onda sinusoidal deseada.

Para la resolución de la comparación de las técnicas de control se propone el algoritmo definido en la figura 15. En el cual, para cada caso se evalúa el error en estado estable de cada controlador. Donde para efectos de validación, se considerará la regulación ARCERNR 002/20 [38], en cual indica un error menor al seis por ciento de la calidad, de no cumplirse la condición, se deberá replantear el diseño de los controladores.

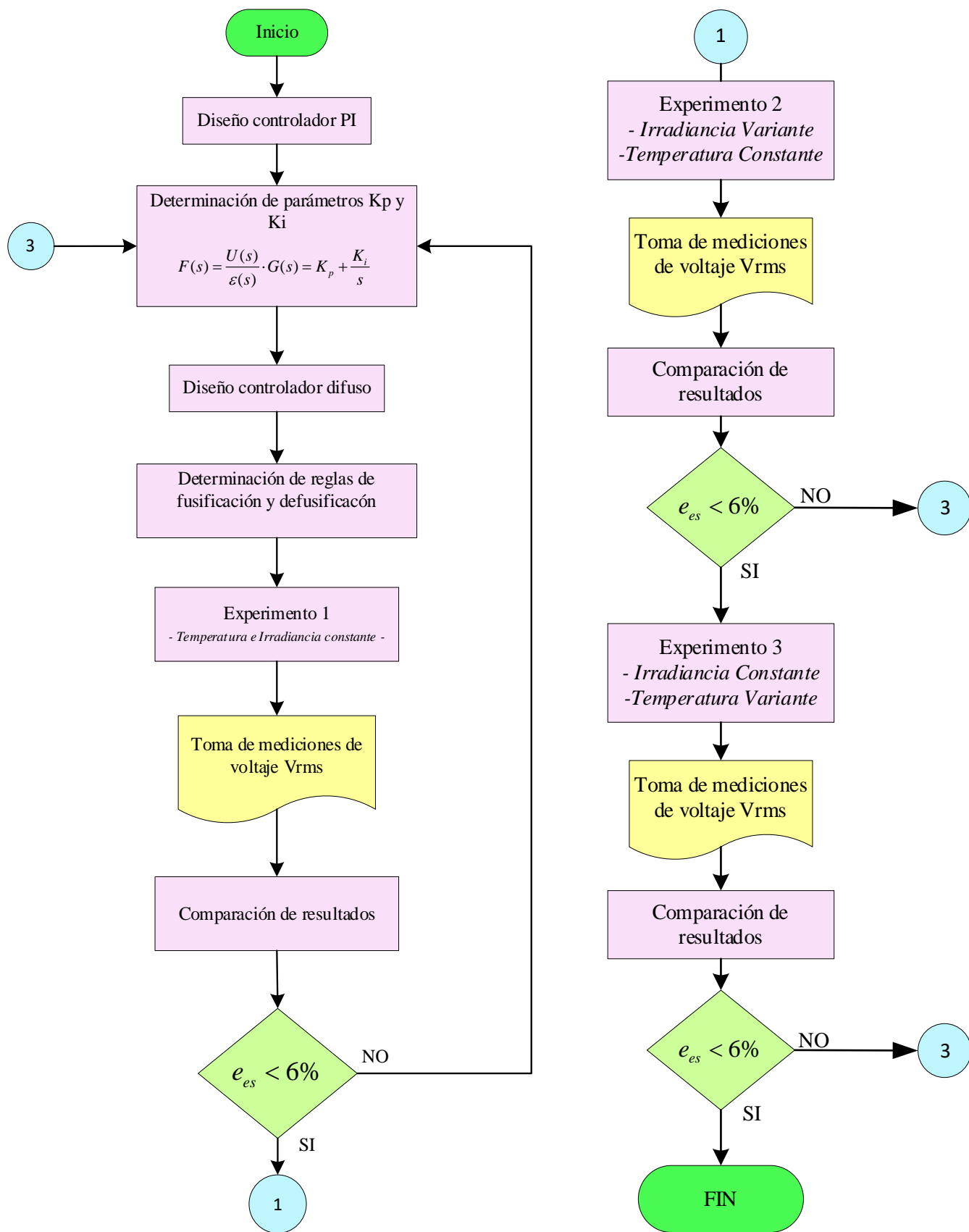


Figura 15. Diagrama de flujo del estudio comparativo PI y difuso [Autor]

4. Análisis de Resultados

Para el análisis de los resultados se tomará en cuenta cambios en las condiciones ambientales de irradiancia y temperatura de los paneles fotovoltaicos. El módulo implementado es de tipo 1Soltech 1STH-215-P con 40 arreglos en paralelo y 10 en serie. En la tabla 5 se detalla las especificaciones del módulo.

Tabla 5. Especificaciones del módulo fotovoltaico [Autor]

Parámetro	Cantidad	Unidad
Potencia máxima	213,15	[W]
Voltaje circuito abierto	36,3	[V]
Punto voltaje máximo	29	[V]
Celdas por modulo	60	-
Corriente de cortocircuito	7,84	[A]
Punto corriente máxima	7,35	[A]

El detalle de la configuración del sistema fotovoltaico se describe en la tabla 6, tomados del caso de estudio de [21][39], para efectos prácticos se ha implementado la frecuencia de trabajo de la red del sistema Ecuatoriano.

Tabla 6. Parámetros del sistema fotovoltaico [Autor]

Parámetros	Valor	Unidad
Modulo PV	1	[Kw]
Enlace CC capacitor	470	[μF]
Suministro de voltaje CC	325	[V]
f (frecuencia de la red)	60	[Hz]
Frecuencia de conmutación	6	[kHz]
RLC (Filtro por fase)	1 0.4e-2 5,50E-03	[Omhs] [H] [F]
Voltaje pico ideal del Inversor	440	[V]
Potencia inductiva de la carga (No lineal)	110	[W]
C (Capacitancia del enlace CC)	4,70E-04	[F]
Ts (Tiempo de muestreo)	5,00E-05	[s]

Los cambios en las condiciones ambientales se los ha realizado en tres experimentos, para el primer caso se ha considerado irradiancia y temperatura constante como se muestra las figuras 16 y 17.

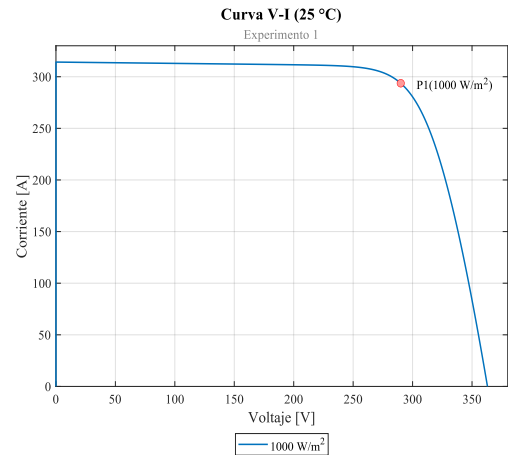


Figura 16. Grafica V-I del sistema fotovoltaico a irradiancia constante [Autor]

En la figura 16 se muestra el punto máximo del voltaje y la corriente de los módulos a 25°C y 1000 (W/m²).

Para la figura 17 se detalla la curva potencia y voltaje, en el mismo que, se aprecia el punto de potencia máxima para las condiciones ya antes mencionadas.

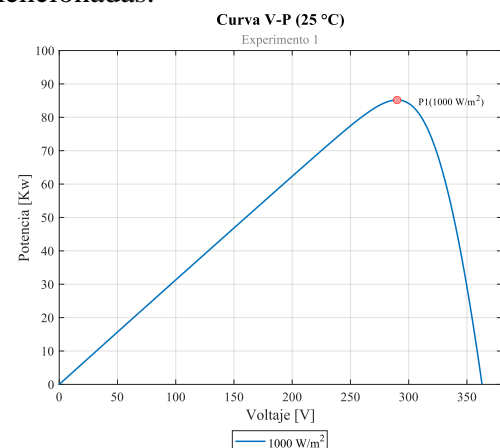


Figura 17. Grafica V-P del sistema fotovoltaico a irradiancia constante [Autor]

Para el segundo caso se mantendrá constante la temperatura y se realizará variaciones en la irradiancia como se muestra en la figura 18 y 19

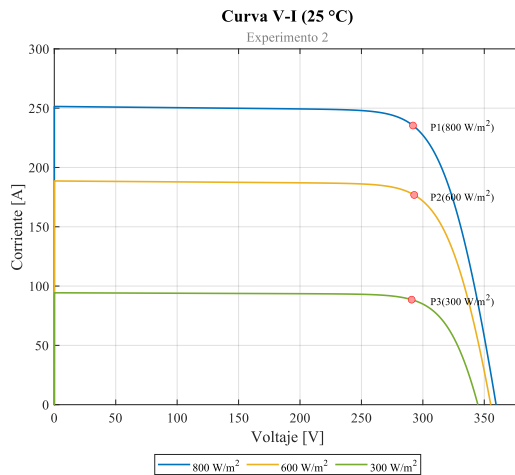


Figura 18. Gráfica V-I del sistema fotovoltaico con irradiancia variante [Autor]

En la figura 18 se aprecia que, a medida que la irradiancia crece, el voltaje y la corriente aumentan también. Por otro lado, el punto de potencia máxima incrementa levemente ante los cambios de irradiancia.

La figura 19 muestra el comportamiento de la potencia y el voltaje a distinta irradiancia, donde se puede apreciar que el punto de potencia máxima del sistema incrementa importantemente.

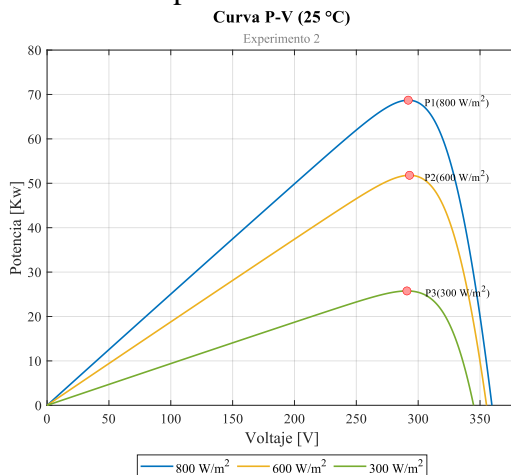


Figura 19. Gráfica P-V del sistema fotovoltaico a irradiancia variante [Autor]

Para el último y tercer caso, se pondrá a prueba el sistema con irradiancia constante y cambios de temperatura como se muestra en la figura 19

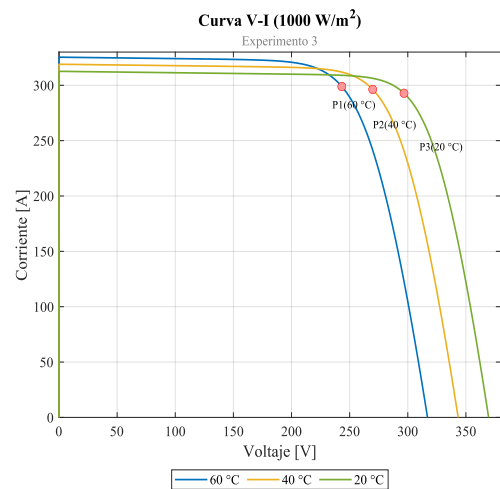


Figura 20. Gráfica V-I del sistema fotovoltaico con temperatura variante [Autor]

En la figura 20 se aprecia que ante los cambios de temperatura la corriente en el arreglo no muestra modificaciones importantes en relación con el segundo caso. En tanto que el voltaje presenta ligeros cambios ante dichas condiciones.

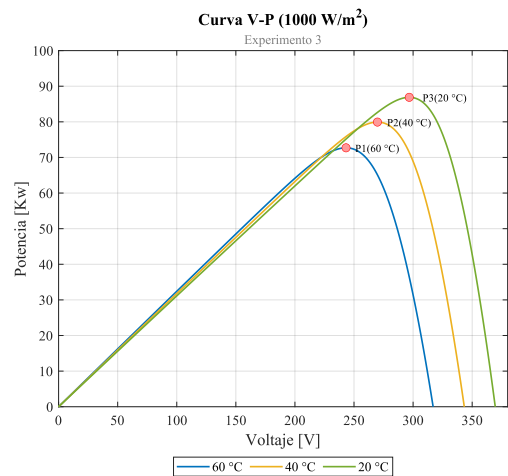


Figura 21. Gráfica P-V del sistema fotovoltaico a temperatura variante [Autor]

En la figura 21 se muestra que el punto de potencia máxima del sistema ante las variaciones de temperatura, el cual no genera impactos notables como en el caso anterior.

En la tabla 6 se detalla los puntos máximos de potencia, de los tres experimentos puestos a prueba.

Tabla 7. Puntos de potencia máxima de los experimentos [Autor]

Experimento	Irradiancia [W/m ²]	Temperatura [°C]	Pmp [Kw]
1	1000	25	85.17
	800		68.72
	600		51.8
2	300	60	25.76
			72.7
3	1000	40	79.3
		20	86.89

En la figura 22 se muestra el voltaje en corriente continua (Vdc). El valor medio de voltaje entregado por el convertidor es de 340 V.

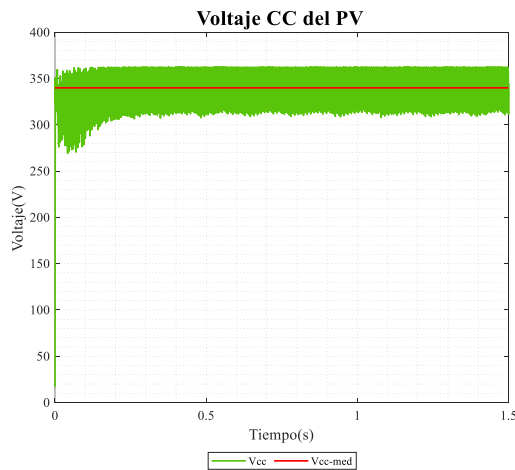


Figura 22. Voltaje de corriente continua entregado por el panel fotovoltaico [Autor]

4.1 Experimento 1

Para la evaluación de este experimento se ha tomado como condiciones meteorológicas, irradiancia y temperatura constante como se muestra en la Tabla 6.

Para la figura 23 se presenta la forma de onda trifásica a la salida del inversor en etapa transitoria, resultado del control PI al ciclo de trabajo. Se puede apreciar que el voltaje de cada una de las fases crece levemente hasta los 0.32 segundos

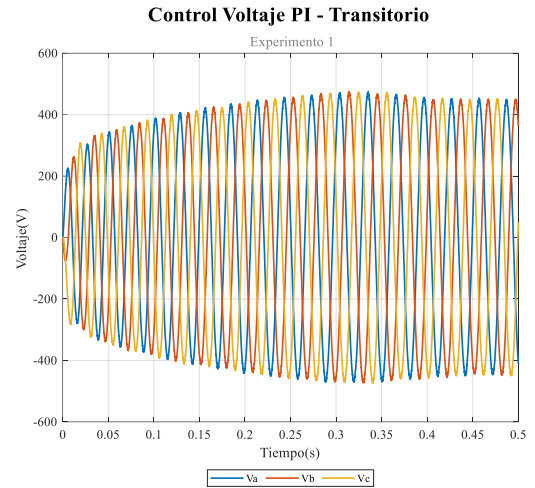


Figura 23. Control PI en etapa transitoria (Experimento 1) [Autor]

Para la figura 24 de la misma manera se presenta el voltaje trifásico del control difuso en etapa transitoria, la tensión de cada una de las fases crece minuciosamente durante 0.06 segundos.

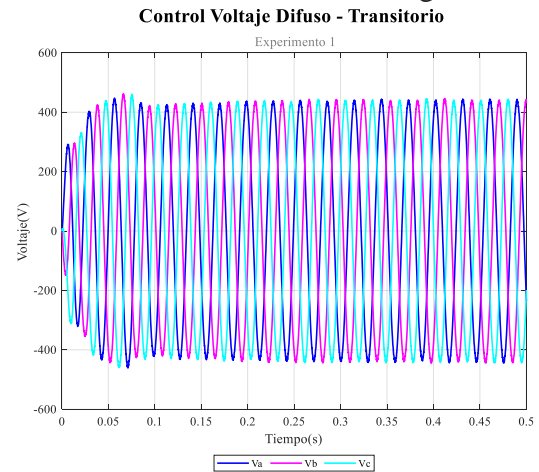


Figura 24. Control Difuso en etapa transitoria (Experimento 1) [Autor]

Para las figuras 25 y 26 se muestra el control PI y difuso en estado estacionario correspondientemente, por lo que se puede apreciar que el controlador difuso presenta una mejor estabilidad a lo largo del tiempo, debido a que ante las condiciones climáticas presenta una mejor calidad de voltaje manteniéndolo en 425 [V] entre 0.5 a 1 segundos .

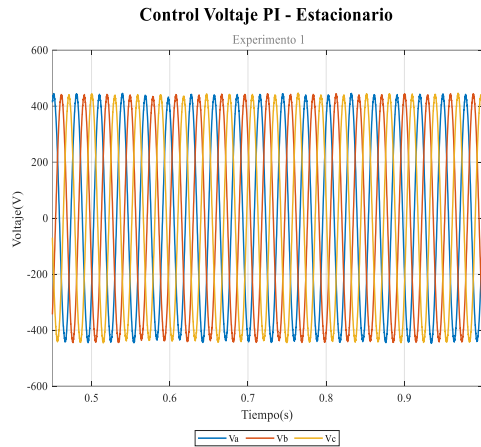


Figura 25. Control PI en estado estacionario (Experimento 1) [Autor]

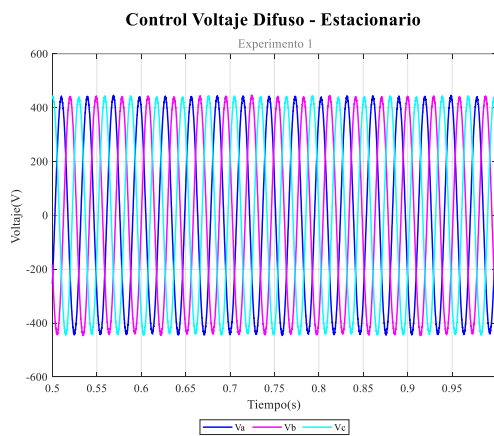


Figura 26. Control Difuso en estado estacionario (Experimento 1)

Para realizar un estudio de comparación efectivo, se obtendrán las características de los sistemas de control que se definen en valores del dominio del tiempo. Por tal razón es importante tener en cuenta los términos de la tabla 8.

Tabla 8. Variables características de los controladores [Autor]

Variable	Descripción
V_p	Valor sobre impulso
T_{sp}	Tiempo de sobre pico
T_{es}	Tiempo de establecimiento
e_{es}	Error en estado estacionario

Una vez definido los términos característicos del control, se presenta en la figura 27 el voltaje RMS del controlador PI

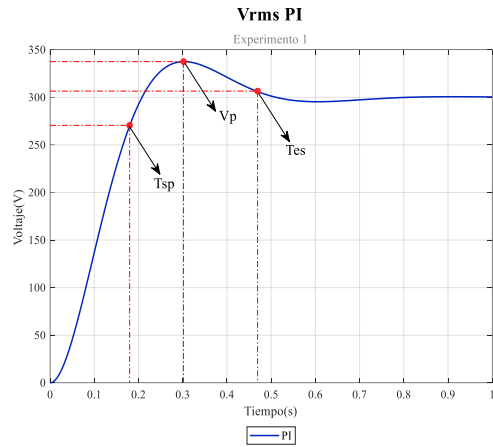


Figura 27. Vrms del controlador PI (Experimento 1) [Autor]

Como resultado de control PI a lo largo del tiempo a los 4 segundos, Se han obtenido los siguientes resultados.

Tabla 9. Valores característicos del controlador PI (Experimento 1) [Autor]

Variable	Cantidad	Unidad
V_p	337,47	[V]
T_{sp}	0,18	[seg]
T_{es}	0,47	[seg]
e_{es}	0.4667	%

En la figura 27 se muestra el resultado de la tensión RMS del control difuso. A simple vista se puede ver que en comparación al control PI la señal presenta mejor calidad.

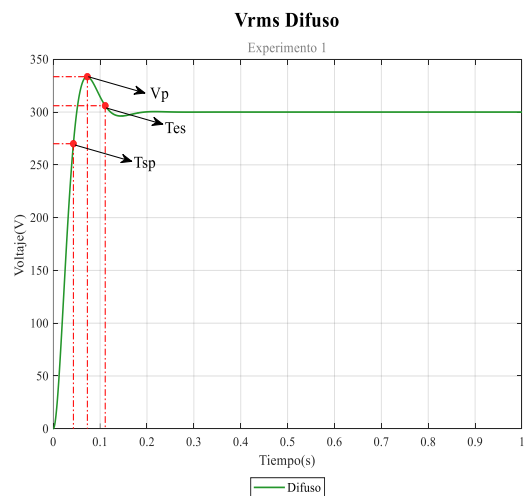


Figura 28. Vrms del controlador difuso (Experimento 1) [Autor]

Para corroborar dicha afirmación se presenta los valores característicos de dicha señal, véase la tabla 10.

Tabla 10. Valores característicos del controlador difuso (Experimento 1) [Autor]

Variable	Cantidad	Unidad
V_p	333,509	[V]
T_{sp}	0,043	[seg]
T_{es}	0,111	[seg]
e_{es}	0,133	%

4.2 Experimento 2

Para la sección actual, los controladores se verán afectados por cambios de irradiancia, mientras que, la temperatura se mantendrá constante como se describe en la tabla 6.

En la figura 29 se presta el resultado en etapa transitoria del control PI, donde en comparación al caso anterior no existe gran diferencia, el voltaje crece levemente hasta 0.31 segundos.

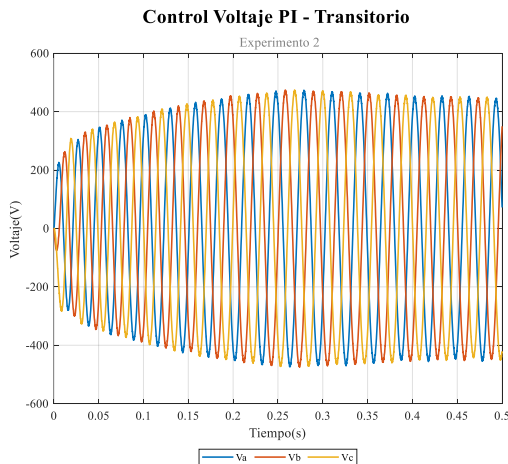


Figura 29. Control PI en etapa transitoria (Experimento 2) [Autor]

Para la figura 30 se muestra el control difuso de voltaje en etapa transitoria, a diferencia del caso anterior, presenta un leve aumento de voltaje durante 0.15 segundos.

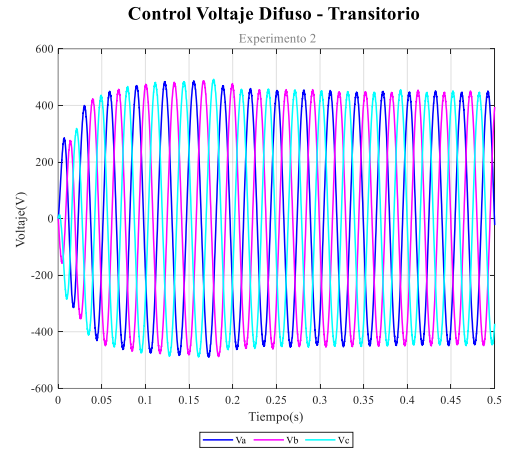


Figura 30. Control PI en etapa transitoria (Experimento 2)

Para las figuras 31 y 32, se observa el desempeño de los controladores en estado estacionario. Se aprecia que ante dichas condiciones meteorológicas el control difuso es mejor, a razón de que, mantiene el voltaje en 425 [V] a lo largo del tiempo.

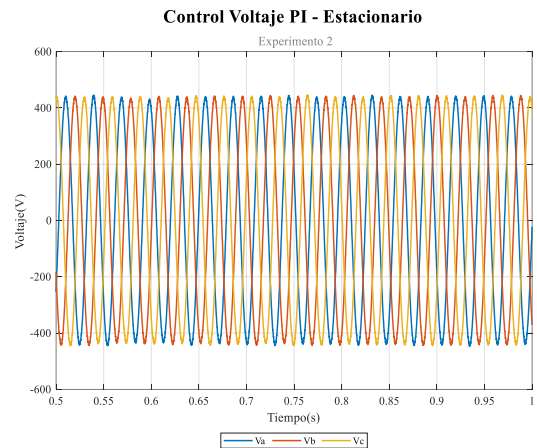


Figura 31. Control PI en estado estacionario (Experimento 2) [Autor]

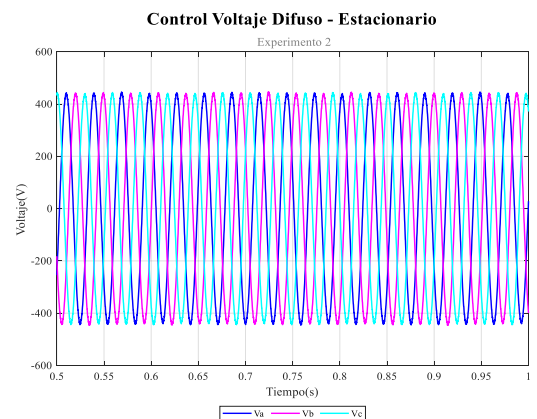


Figura 32. Control Difuso en estado estacionario (Experimento 2) [Autor]

En la figura 33 se detalla el comportamiento del controlador PI para el caso 2. En comparación al experimento anterior se puede apreciar que el tiempo de establecimiento ha disminuido ligeramente, el voltaje pico de la onda se mantiene en valores aceptables.

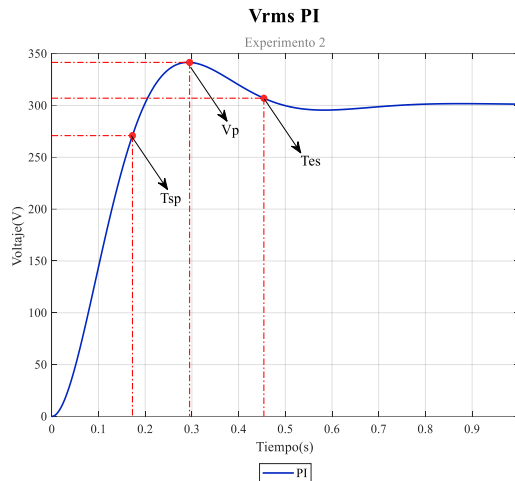


Figura 33. Vrms del controlador PI (Experimento 2) [Autor]

Como resultados característicos de la onda a lo largo de 1 segundo se presenta la tabla 11 con dichos resultados.

Tabla 11. Valores característicos del controlador PI (Experimento 2) [Autor]

Variable	Cantidad	Unidad
V_p	341,56	[V]
T_{sp}	0,173	[seg]
T_{es}	0,454	[seg]
e_{es}	0,812	%

En la figura 34 se detalla el comportamiento de la onda del controlador difuso para el caso 2, en comparación al experimento anterior se puede visualizar que el tiempo de establecimiento ha aumentado levemente, en tanto que, el voltaje pico ha aumentado ligeramente.

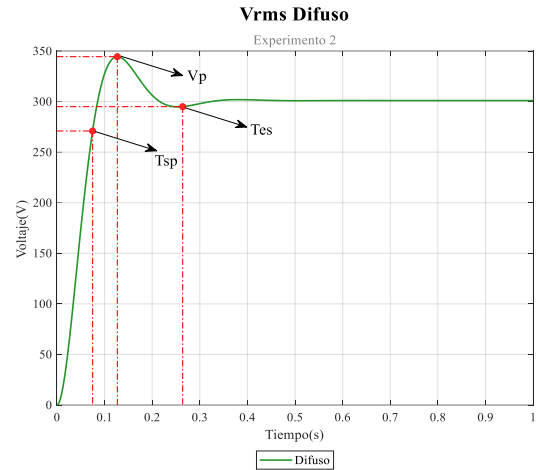


Figura 34. Vrms del controlador difuso (Experimento 2) [Autor]

Como resultados característicos de onda, para una toma tiempo de 1 segundo. Se han obtenido los siguientes valores, véase la tabla 12

Tabla 12. Valores característicos del controlador difuso (Experimento 2) [Autor]

Variable	Cantidad	Unidad
V_p	344,41	[V]
T_{sp}	0,075	[seg]
T_{es}	0,2641	[seg]
e_{es}	0,096	%

4.3 Experimento 3

Para la evaluación del último caso experimental, se podrán a prueba a los controladores a cambios de temperatura, mientras que, la irradiancia se mantendrá constate como se detalla en la tabla 6.

Para la figura 35, se presenta el control PI de voltaje etapa transitoria, como se aprecia el voltaje aumenta levemente durante 0.25 segundos, en relación con el caso anterior no presenta cambios considerables.

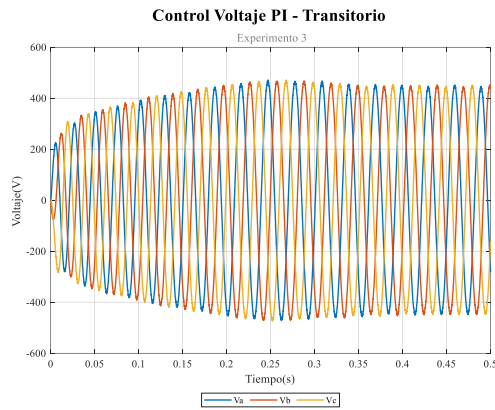


Figura 35. Control PI en etapa transitoria (Experimento 3) [Autor]

Para la figura 36, se muestra el control de voltaje en estado transitorio. Durante 0.15 segundos el voltaje aumenta notablemente, pasado dicho tiempo la tensión comienza a llegar a su etapa estable.

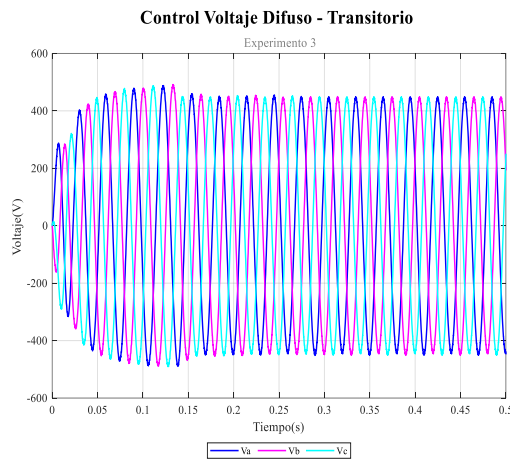


Figura 36. Control PI en etapa transitoria (Experimento 3) [Autor]

Para las figuras 37 y 38 se presenta el control de tensión de los controladores PI y difuso respectivamente, para las condiciones meteorológicas antes mencionadas, el control difuso presenta mejor calidad a razón de que mantiene el voltaje estable en 425 [V], en comparación al control PI que le toma más tiempo en estabilizarse y poder llegar al voltaje deseado.

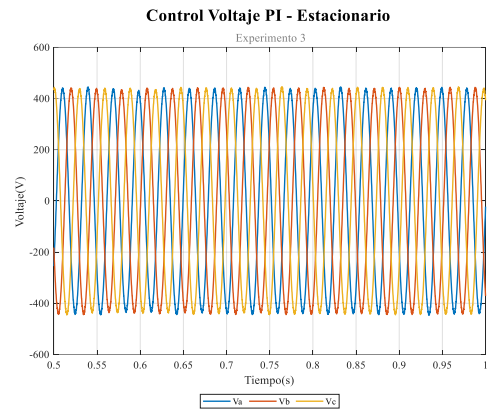


Figura 37. Control PI en estado estacionario (Experimento 3) [Autor]

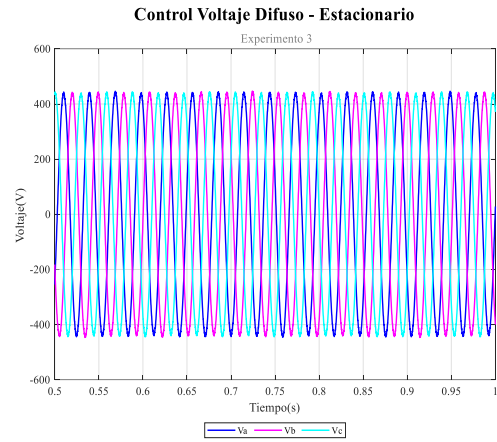


Figura 38. Control PI en estado estacionario (Experimento 3) [Autor]

Para la figura 39 se muestra la onda resultante del control PI, donde para los casos anteriores el voltaje llega a estabilizar en un menor tiempo. Ante la perturbación de carga el control llega a estabilizar la tensión exitosamente como en sus casos anteriores.

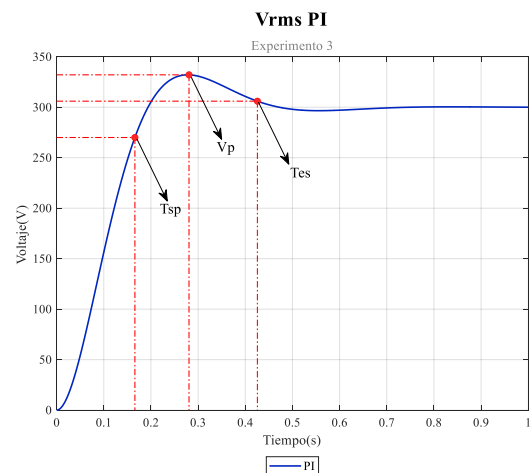


Figura 39. Vrms del controlador PI (Experimento 3) [Autor]

Para la Tabla 13, se muestra los valores característicos de la onda tomados para un tiempo de 1 segundo.

Tabla 13. Valores característicos del controlador PI (Experimento 3) [Autor]

Variable	Cantidad	Unidad
V_p	332,06	[V]
T_{sp}	0,166	[seg]
T_{es}	0,426	[seg]
e_{es}	0,633	%

Para la figura 40, se prestan la onda resultante del control difuso, ante las variaciones de temperatura, el voltaje pico alcanza los 300 voltios deseados en un tiempo menor a los 0.3 segundos, mientras que, el tiempo de establecimiento es menor al caso anterior. A simple vista el control difuso es bastante efectivo ante los cambios climáticos.

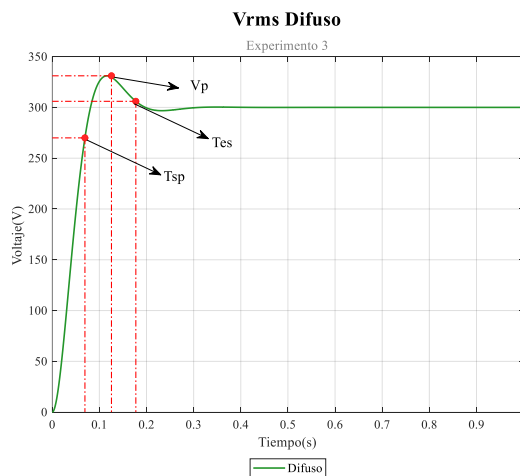


Figura 40. Vrms del controlador difuso (Experimento 3) [Autor]

Para la tabla 14 se muestra los valores característicos del control difuso a lo largo de 1 segundo.

Tabla 14. Valores característicos del controlador difuso (Experimento 3) [Autor]

Variable	Cantidad	Unidad
V_p	331,112	[V]
T_{sp}	0,0694	[seg]
T_{es}	0,1774	[seg]
e_{es}	0.0667	%

5. Conclusiones

Ante las extensas formas y metodologías de controlar el voltaje de un inversor fotovoltaico, la inclusión de metodologías heurísticas como la lógica difusa han permitido establecer criterios de mejora de la calidad del voltaje, a razón de que existe una amplia información, debido a que son métodos nuevos y cada vez más estudiados e investigados.

A través de los resultados comparativos realizado en la investigación actual, se exponen los siguientes aspectos concluyentes:

El diseño de la estrategia de control difuso cumple exitosamente estabilizando el voltaje a la salida del inversor, debido a que, para los tres casos experimentales en sus estados transitorio y permanente, presenta un control de calidad con bajos porcentajes de error en etapa estable. Observando los experimentos 1,2 y 3 el error es: 0.133%, 0.096%, 0.0667% respectivamente, en comparación al control PI que presenta errores de 0.4667%, 0.812%, 0.633%. considerando que dicho control presenta valores aceptables, sin embargo, el control difuso detalla mejores valores de calidad.

Con respecto al tiempo de sobre pico, el controlador PI presenta valores aptos por debajo de los 0.18 segundos. Siendo más rápido en actuar el controlador difuso, ya que muestra mejores valores de calidad por debajo de los 0.075 segundos como se observa en las tablas 9-14. Por otro lado, los valores de voltaje pico que entrega el control PI de: 337.47, 341.56 y 332.065 voltios son bastante similares en comparación al control difuso, ya que describe valores de 333.51, 344.41 y 331.113 voltios, no obstante, presenta mejores valores a lo largo del tiempo.

Ante las variaciones de irradiancia y temperatura los controladores cumplen exitosamente estabilizando la tensión a los 300 voltios deseados, sin embargo, la estrategia de control que presenta mejor calidad a la salida del inversor es el difuso, por sus resultados favorables ante el control clásico PI. Sabiendo que los inversores trifásicos son sistemas altamente no lineales, un control difuso no lineal responde con gran eficiencia y calidad. Para lo cual se recomienda el uso de los controladores difusos para niveles de voltaje de media tensión en aplicaciones industriales, domésticas y aceptables también para la entrega de voltaje a la red pública.

6. Trabajos futuros

El estudio comparativo realizado deja abierto a temas de investigación como el acoplamiento de baterías para la estabilidad de tensión en sistemas fotovoltaicos de tipo aislados. Se puede considerar también en la implementación de un control combinado PI-difuso que permita en primera instancia mediante el control difuso manejar las constantes proporcionales e integrales del controlador PI, para luego este poder controlar las modulaciones por ancho de pulso, de esta manera se aprovecharía los beneficios de cada controlador. Por otro lado, un control que está en auge es el neuro difuso, el cual combina la metodología por redes neuronales con la lógica difusa, una metodología combinada que aprovecharía bastante para mejorar la calidad del control y en consecuencia mejorar los perfiles de voltaje del sistema.

7. Referencias

- [1] R. D. Chang, J. Zuo, Z. Y. Zhao, G. Zillante, X. L. Gan, and V. Soebarto, "Evolving theories of sustainability and firms: History, future directions and

implications for renewable energy research," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72. Elsevier Ltd, pp. 48–56, May 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.029.

- [2] W. Pavón, E. Inga, and S. Simani, "Optimal Distribution Network Planning applying Heuristic Algorithms Considering allocation of PV Rooftop Generation," in *2020 IEEE ANDESCON*, 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272062.
- [3] H. M. Foroushani, M. Mohammadrezaei, S. M. Madani, and A. Sayyar, "A single-stage three-phase grid-connected photovoltaic system with fast grid voltage regulation," in *30th Power System Conference, PSC 2015*, Jan. 2017, pp. 305–308, doi: 10.1109/IPSC.2015.7827764.
- [4] N. A. Rahim and J. Selvaraj, "Multistring five-level inverter with novel PWM control scheme for PV application," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 6, pp. 2111–2123, Jun. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2034683.
- [5] A. M. Howlader, S. Sadoyama, L. R. Roose, and Y. Chen, "Active power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart PV inverters," *Appl. Energy*, vol. 258, p. 114000, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114000.
- [6] M. Yang, C. Wang, Y. Hu, Z. Liu, and C. Yan, "Load Frequency Control of Photovoltaic Generation-Integrated Multi-Area Interconnected Power Systems

- Based on Double Equivalent-Input-Disturbance Controllers,” pp. 1–19, 2020, doi: 10.3390/en13226103.
- [7] E. M. Darwish, H. M. Hasanien, A. Atallah, and S. El-Debeiky, “Reactive power control of three-phase low voltage system based on voltage to increase PV penetration levels,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, no. 4. Ain Shams University, pp. 1831–1837, Dec. 01, 2018, doi: 10.1016/j.asej.2017.01.006.
- [8] N. Altin and S. Ozdemir, “Three-phase three-level grid interactive inverter with fuzzy logic based maximum power point tracking controller,” in *Energy Conversion and Management*, May 2013, vol. 69, pp. 17–26, doi: 10.1016/j.enconman.2013.01.012.
- [9] W. D. P. Vallejos, “Standalone photovoltaic system, using a single stage boost DC/AC power inverter controlled by a double loop control,” in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2017.8126705.
- [10] S. Chaudhary and S. N. Singh, “Single Phase Grid Interactive Solar Photovoltaic Inverters: A Review,” in *2018 National Power Engineering Conference, NPEC 2018*, Sep. 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/NPEC.2018.8476767.
- [11] D. Sankar and C. A. Babu, “Cascaded H bridge multilevel inverter topologies for PV application: A comparison,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2016*, Aug. 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICCPCT.2016.7530140.
- [12] J. M. Carrasco *et al.*, “Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4. pp. 1002–1016, Jun. 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.878356.
- [13] M. A. Khan, A. Haque, and V. S. Bharath Kurukuru, “Enhancement of Fault ride through strategy for single-phase grid-connected photovoltaic systems,” in *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2019*, Sep. 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/IAS.2019.8911895.
- [14] R. Mechouma, B. Azoui, and M. Chaabane, “Three-phase grid connected inverter for photovoltaic systems, a review,” in *2012 1st International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology, REVET 2012*, 2012, pp. 37–42, doi: 10.1109/REJET.2012.6195245.
- [15] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Águila, J. W. González, G. J. López, and I. Isaac, “Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode,” *Heliyon*, vol. 5, no. 12, p. e02862, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02862.
- [16] Y. P. Siwakoti and F. Blaabjerg, “A novel flying capacitor transformerless inverter for single-phase grid connected solar photovoltaic system,” Jul. 2016, doi: 10.1109/PEDG.2016.7527086.
- [17] Z. Wei, L. Hongpeng, and W. Wei, “Harmonic suppression

- strategy for voltage-controlled grid-connected inverter based on parameter optimization,” in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2017*, Oct. 2017, pp. 1–5, doi: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080792.
- [18] L. Ortiz, J. W. González, L. B. Gutierrez, and O. Llanes-Santiago, “A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids,” *Heliyon*, vol. 6, no. 8. Elsevier Ltd, p. e04799, Aug. 01, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04799.
- [19] Y. Jia and R. Wu, “Voltage source grid-connected PV inverters based on MPPT and droop control,” in *2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference, SPEC 2016*, Dec. 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/SPEC.2016.7846033.
- [20] Z. Yang, H. Li, F. Lin, B. Zhang, and J. Lü, “Common-Mode Electromagnetic Interference Calculation Method for a PV Inverter With Chaotic SPWM,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 11, pp. 1–4, Nov. 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2443065.
- [21] W. J. Praiselin and J. B. Edward, “Voltage Profile Improvement of Solar PV Grid – Connected Inverter with Micro Grid Operation using PI Controller,” *Energy Procedia*, vol. 117, pp. 104–111, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.112>.
- [22] B. Pakkiraiah and G. D. Sukumar, “A new modified MPPT controller for improved performance of an asynchronous motor drive under variable irradiance and variable temperature,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 38, no. 2–3, pp. 61–74, Jul. 2016, doi: 10.1080/1206212X.2016.1188586.
- [23] N. Afrin, F. Yang, and J. Lu, “Voltage support strategy for PV inverter to enhance dynamic voltage stability of islanded microgrid,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 121, p. 106059, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106059.
- [24] Q. Zhang, M. Mao, G. Ke, L. Zhou, and B. Xie, “Stability problems of PV inverter in weak grid: A review,” *IET Power Electron.*, vol. 13, no. 11, pp. 2165–2174, Aug. 2020, doi: 10.1049/iet-pel.2019.1049.
- [25] J. He and X. Zhang, “Comparison of the backstepping and PID control of the three-phase inverter with fully consideration of implementation cost and performance,” *Chinese J. Electr. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 82–89, 2018, doi: 10.23919/CJEE.2018.8409353.
- [26] D. Baimel, “Implementation of DQ0 control methods in high power electronics devices for renewable energy sources, energy storage and FACTS,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 18. Elsevier Ltd, p. 100218, Jun. 01, 2019, doi: 10.1016/j.segan.2019.100218.
- [27] M. A. Hannan, Z. A. Ghani, M. M. Hoque, P. J. Ker, A. Hussain, and A. Mohamed, “Fuzzy Logic Inverter Controller in Photovoltaic Applications: Issues and Recommendations,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24934–24955, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2899610.
- [28] S. Rakshit and J. Maity, “Three Phase, 10 kVA Dual Conversion type Automatic AC Voltage

- Regulator-An Approach based on Fuzzy Logic Controlled ĆUK Converter and PI Controlled Three Phase Inverter,” in *8th IEEE Power India International Conference, PIICON 2018*, Jul. 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/POWERI.2018.8704391.
- [29] Y. A. R. I. Mohamed and E. F. El-Saadany, “A control method of grid-connected PWM voltage source inverters to mitigate fast voltage disturbances,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 1, pp. 489–491, Feb. 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2008.2006996.
- [30] D. Pathak, G. Sagar, and P. Gaur, “An Application of Intelligent Non-linear Discrete-PID Controller for MPPT of PV System,” in *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 167, pp. 1574–1583, doi: 10.1016/j.procs.2020.03.368.
- [31] I. Sefa, N. Altin, S. Ozdemir, and O. Kaplan, “Fuzzy PI controlled inverter for grid interactive renewable energy systems,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, no. 7, pp. 729–738, Sep. 2015, doi: 10.1049/iet-rpg.2014.0404.
- [32] A. Arzani, P. Arunagirinathan, and G. K. Venayagamoorthy, “Development of optimal PI controllers for a grid-tied photovoltaic inverter,” in *Proceedings - 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2015*, Dec. 2015, pp. 1272–1279, doi: 10.1109/SSCI.2015.182.
- [33] F. K. Abo-Elyousr and A. Y. Abdelaziz, “Optimal PI microcontroller-based realization for technical trends of single-stage single-phase grid-tied PV,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 21, no. 5, pp. 945–956, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jestch.2018.07.007.
- [34] M. A. Balamurugan and M. S. Ranjith, “JOURNAL OF CRITICAL REVIEWS FAULTS ANALYSIS IN PV ARRAY BASED ON PRE-TURN ON/OFF CONDITION OF THE PV INVERTER,” 2020, doi: 10.31838/jcr.07.05.355.
- [35] Y. Liu, P. Liu, H. Wang, M. Huang, and X. Zha, “Two-thermal-states model predictive control for IGBT in three-phase inverter,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 88–90, pp. 1098–1102, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.microrel.2018.07.096.
- [36] D. Rahman, S. Motakabber, and M. Ibrahimy, *Design of a Switching Mode Three Phase Inverter*. 2016.
- [37] M. B. H. Rhouma, A. Gastli, L. Ben Brahim, F. Touati, and M. Benammar, “A simple method for extracting the parameters of the PV cell single-diode model,” *Renew. Energy*, vol. 113, pp. 885–894, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.06.064.
- [38] “(No Title).” <http://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/Regulacion-002-20.pdf> (accessed Mar. 21, 2021).
- [39] M. Lakshmi and S. Hemamalini, “Decoupled control of grid connected photovoltaic system using fractional order controller,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 927–937, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.asej.2016.06.002.

8. Estado del Arte

Tabla 15. Tabla del estado del arte

ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROL PI Y DIFUSO PARA LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EVALUANDO EL VOLTAJE EN ESTADO TRANSITORIO Y ESTABLE																						
	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN INVERSORES	ENERGIA RENOVABLES	CONTROLADORES PID	LOGICA DIFUSA	CONTROL INVERSORES FOTOVOLTAICOS	MODELAMIENTO DE ESTRATEGIA DE CONTROL PI	MODELAMIENTO DE ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO	COMPARACION DE MODELOS	ELECCION DEL MEJOR CONTROLADOR DE VOLTAJE	CALIDAD DE DE VOLTAJE	PARAMETROS DEL PANEL FOTOVOLTAICO	CAMBIOS AMBIENTALES	TRANSFORMADAS DE FOURIER	EVALUACION DE ESTABILIDAD	SISTEMAS COMPLEJOS	EVALUACION EN REGIMEN PERMANENTE DE VOLTAJE	EVALUACION EN ESTADO TRANSITORIO	ERROR EN ESTADO ESTABLE	EVALUACION DE POCENTAJE DE OSCILACIONES
1	2017	Evolving theories of sustainability and firms: History, future directions and implications for renewable energy research	75		✗		✗						✗	✗								
2	2020	Optimal Distribution Network Planning applying Heuristic Algorithms Considering allocation of PV Rooftop Generation	2	✗	✗		✗	✗														
3	2015	A single-stage three-phase grid-connected photovoltaic system with fast grid voltage regulation	3	✗	✗	✗		✗	✗				✗	✗	✗		✗	✗		✗	✗	
4	2010	Multistring five-level inverter with novel PWM control scheme for PV application	330	✗	✗	✗		✗	✗				✗		✗		✗	✗				
5	2020	Active power control to mitigate voltage and frequency deviations for the smart grid using smart PV inverters	7	✗	✗	✗		✗	✗				✗		✗	✗		✗	✗		✗	✗
6	2020	Load Frequency Control of Photovoltaic Generation-Integrated Multi-Area Interconnected Power Systems Based on Double Equivalent-Input-Disturbance Controllers	6	✗	✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	

ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROL PI Y DIFUSO PARA LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EVALUANDO EL VOLTAJE EN ESTADO TRANSITORIO Y ESTABLE

	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN INVERSORES	ENERGIA RENOVABLES	CONTROLADORES PID	LOGICA DIFUSA	CONTROL INVERSORES FOTOVOLTAICOS	MODELAMIENTO DE ESTRATEGIA DE CONTROL PI	MODELAMIENTO ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO	COMPARACION DE MODELOS	ELECCION DEL MEJOR CONTROLADOR DE VOLTAJE	CALIDAD DE DE VOLTAJE	PARAMETROS DEL PANEL FOTOVOLTAICO	CAMBIOS AMBIENTALES	TRANSFORMADAS DE LAPLACE	EVALUACION ESTABILIDAD	SISTEMAS COMPLEJOS	EVALUACION EN REGIMEN PERMANENTE DE VOLTAJE	EVALUACION EN ESTADO TRANSITORIO	ERROR EN ESTADO ESTABLE	EVALUACION DE POCENTAJE DE OSCILACIONES
7	2018	Reactive power control of three-phase low voltage system based on voltage to increase PV penetration levels	14	✗	✗								✗			✗	✗			✗		
8	2013	Three-phase three-level grid interactive inverter with fuzzy logic based maximum power point tracking controller	97	✗	✗		✗	✗		✗			✗	✗	✗	✗	✗		✗		✗	✗
9	2017	Standalone photovoltaic system, using a single stage boost DC/AC power inverter controlled by a double loop control	8	✗	✗	✗		✗				✗							✗	✗		✗
10	2018	Single Phase Grid Interactive Solar Photovoltaic Inverters: A Review	3	✗	✗			✗														
11	2016	Cascaded H bridge multilevel inverter topologies for PV application: A comparison	10	✗	✗								✗						✗		✗	✗
12	2006	Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey	4158	✗	✗			✗					✗			✗						
13	2019	Enhancement of Fault ride through strategy for single-phase grid-connected photovoltaic systems	3	✗	✗			✗						✗					✗	✗		✗
14	2012	Three-phase grid connected inverter for photovoltaic systems, a review	55	✗				✗														
15	2019	Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode	20	✗	✗		✗	✗	✗	✗		✗					✗		✗	✗		

ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROL PI Y DIFUSO PARA LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EVALUANDO EL VOLTAJE EN ESTADO TRANSITORIO Y ESTABLE

	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN INVERSORES	ENERGIA RENOVABLES	CONTROLADORES PID	LOGICA DIFUSA	CONTROL INVERSORES FOTOVOLTAICOS	MODELAMIENTO DE ESTRATEGIA DE CONTROL PI	MODELAMIENTO ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO	COMPARACION DE MODELOS	ELECCION DEL MEJOR CONTROLADOR DE VOLTAJE	CALIDAD DE DE VOLTAJE	PARAMETROS DEL PANEL FOTOVOLTAICO	CAMBIOS AMBIENTALES	TRANSFORMADAS DE LAPLACE	EVALUACION ESTABILIDAD	SISTEMAS COMPLEJOS	EVALUACION EN REGIMEN PERMANENTE DE VOLTAJE	EVALUACION EN ESTADO TRANSITORIO	ERROR EN ESTADO ESTABLE	EVALUACION DE POCENTAJE DE OSCILACIONES
16	2016	A novel flying capacitor transformerless inverter for single-phase grid connected solar photovoltaic system	29	✖	✖		✖	✖											✖	✖	✖	
17	2017	Harmonic suppression strategy for voltage-controlled grid-connected inverter based on parameter optimization	3	✖	✖	✖		✖	✖		✖	✖	✖	✖	✖	✖	✖		✖		✖	
18	2020	A review on control and fault-tolerant control systems of AC/DC microgrids	5				✖			✖				✖					✖	✖		
19	2016	Voltage source grid-connected PV inverters based on MPPT and droop control	6	✖	✖	✖	✖	✖	✖				✖	✖		✖	✖	✖		✖		
20	2015	Common-Mode Electromagnetic Interference Calculation Method for a PV Inverter With Chaotic SPWM	12	✖	✖	✖			✖		✖		✖	✖		✖	✖		✖	✖		
21	2017	Voltage Profile Improvement of Solar PV Grid – Connected Inverter with Micro Grid Operation using PI Controller	15	✖	✖	✖		✖	✖		✖	✖	✖	✖		✖	✖		✖	✖		✖
22	2016	A new modified MPPT controller for improved performance of an asynchronous motor drive under variable irradiance and variable temperature	18	✖	✖			✖			✖	✖	✖	✖	✖	✖	✖	✖	✖		✖	✖
23	2020	Voltage support strategy for PV inverter to enhance dynamic voltage stability of islanded microgrid	3	✖	✖			✖	✖				✖	✖		✖	✖	✖	✖	✖		
24	2020	Stability problems of PV inverter in weak grid: A review	2	✖	✖	✖		✖	✖		✖		✖	✖		✖	✖			✖		✖

ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROL PI Y DIFUSO PARA LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EVALUANDO EL VOLTAJE EN ESTADO TRANSITORIO Y ESTABLE

	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN INVERSORES	ENERGIA RENOVABLES	CONTROLADORES PID	LOGICA DIFUSA	CONTROL INVERSORES FOTOVOLTAICOS	MODELAMIENTO DE ESTRATEGIA DE CONTROL PI	MODELAMIENTO DE ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO	COMPARACION DE MODELOS	ELECCION DEL MEJOR CONTROLADOR DE VOLTAJE	CALIDAD DE DE VOLTAJE	PARAMETROS DEL PANEL FOTOVOLTAICO	CAMBIOS AMBIENTALES	TRANSFORMADAS DE FOURIER	EVALUACION ESTABILIDAD	SISTEMAS COMPLEJOS	EVALUACION EN REGIMEN PERMANENTE DE VOLTAJE	EVALUACION EN ESTADO TRANSITORIO	ERROR EN ESTADO ESTABLE	EVALUACION DE POCENTAJE DE OSCILACIONES
25	2018	Comparison of the back-stepping and PID control of the three-phase inverter with fully consideration of implementation cost and performance	4	✗	✗	✗		✗	✗		✗		✗	✗		✗	✗	✗		✗	✗	
26	2019	Implementation of DQ0 control methods in high power electronics devices for renewable energy sources, energy storage and FACTS	10	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗		✗
27	2019	Fuzzy Logic Inverter Controller in Photovoltaic Applications: Issues and Recommendations	27	✗	✗		✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗		✗	✗
28	2018	Three Phase, 10 kVA Dual Conversion type Automatic AC Voltage Regulator - An Approach based on Fuzzy Logic Controlled Ćuk Converter and PI Controlled Three Phase Inverter	3	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗		✗			✗
29	2009	A control method of grid-connected PWM voltage source inverters to mitigate fast voltage disturbances	30			✗			✗				✗			✗				✗	✗	
30	2020	An Application of Intelligent Non-linear Discrete-PID Controller for MPPT of PV System	8		✗	✗			✗		✗						✗	✗		✗		✗
31	2015	Fuzzy PI controlled inverter for grid interactive renewable energy systems	89	✗	✗	✗	✗			✗			✗		✗				✗		✗	✗
32	2015	Development of optimal PI controllers for a grid-tied photovoltaic inverter	19	✗	✗	✗				✗	✗		✗	✗	✗		✗			✗	✗	
33	2018	Optimal PI microcontroller-based realization for technical trends of single-stage single-phase grid-tied PV	7	✗			✗	✗	✗			✗	✗	✗		✗		✗		✗	✗	

ESTUDIO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROL PI Y DIFUSO PARA LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, EVALUANDO EL VOLTAJE EN ESTADO TRANSITORIO Y ESTABLE

DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN INVERSORES	ENERGIA RENOVABLES	CONTROLADORES PID	LOGICA DIFUSA	CONTROL INVERSORES FOTOVOLTAICOS	MODELAMIENTO DE ESTRATEGIA DE CONTROL PI	MODELAMIENTO DE ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO	COMPARACION DE MODELOS	ELECCION DEL MEJOR CONTROLADOR DE VOLTAJE	CALIDAD DE DE VOLTAJE	PARAMETROS DEL PANEL FOTOVOLTAICO	CAMBIOS AMBIENTALES	TRANSFORMADAS DE LAPLACE	EVALUACION ESTABILIDAD	SISTEMAS COMPLEJOS	EVALUACION EN REGIMEN PERMANENTE DE VOLTAJE	EVALUACION EN ESTADO TRANSITORIO	ERROR EN ESTADO ESTABLE	EVALUACION DE POCENTAJE DE OSCILACIONES
34	2017	JOURNAL OF CRITICAL REVIEWS FAULTS ANALYSIS IN PV ARRAY BASED ON PRE-TURN ON/OFF CONDITION OF THE PV INVERTER	4	✗	✗		✗				✗	✗	✗			✗	✗			✗	✗	
35	2018	Two-thermal-states model predictive control for IGBT in three-phase inverter	10	✗	✗			✗			✗	✗	✗			✗	✗		✗		✗	✗
36	2016	Design of a Switching Mode Three Phase Inverter	18	✗	✗				✗	✗				✗			✗			✗	✗	
37	2017	A simple method for extracting the parameters of the PV cell single-diode model	53	✗	✗		✗		✗	✗		✗					✗				✗	
38	2018	Decoupled control of grid connected photovoltaic system using fractional order controller	30	✗			✗		✗	✗	✗						✗	✗		✗	✗	
CANTIDAD:			34	33	17	16	24	20	10	15	12	26	20	11	18	23	13	20	22	19	14	

Resumen Indicadores

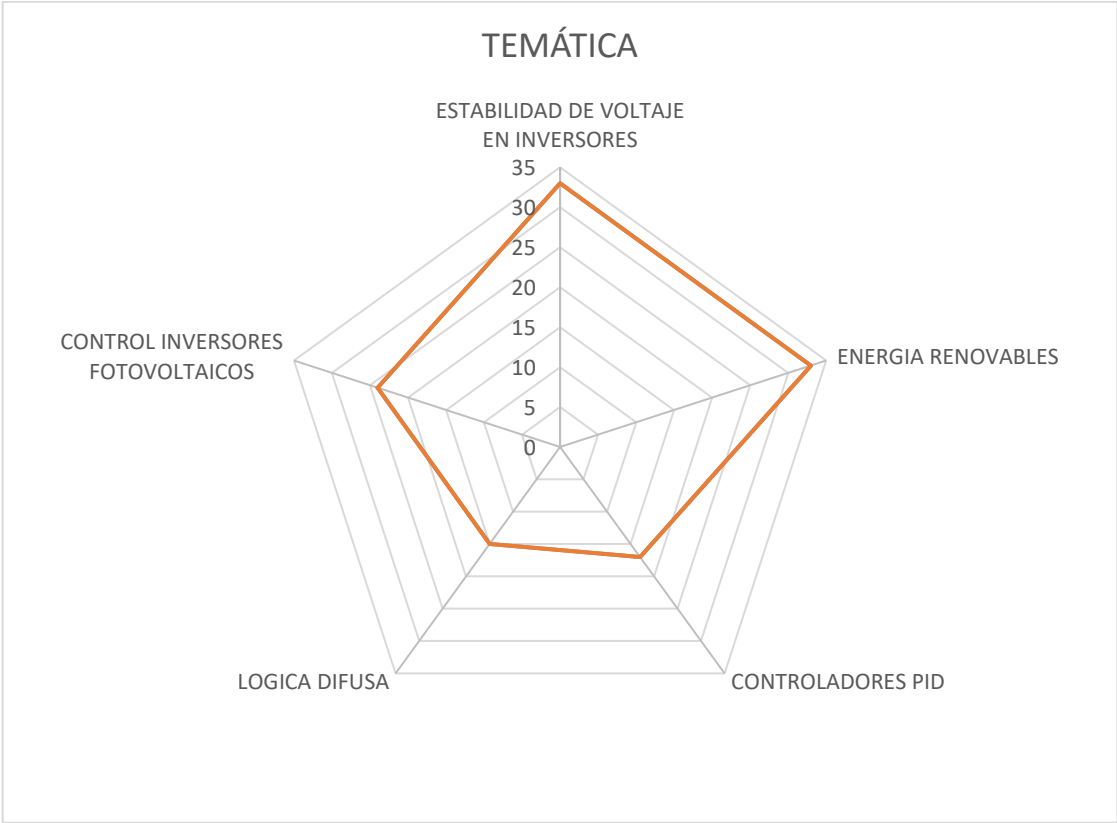


Figura 41. Resumen e indicador de la temática- Estado del arte

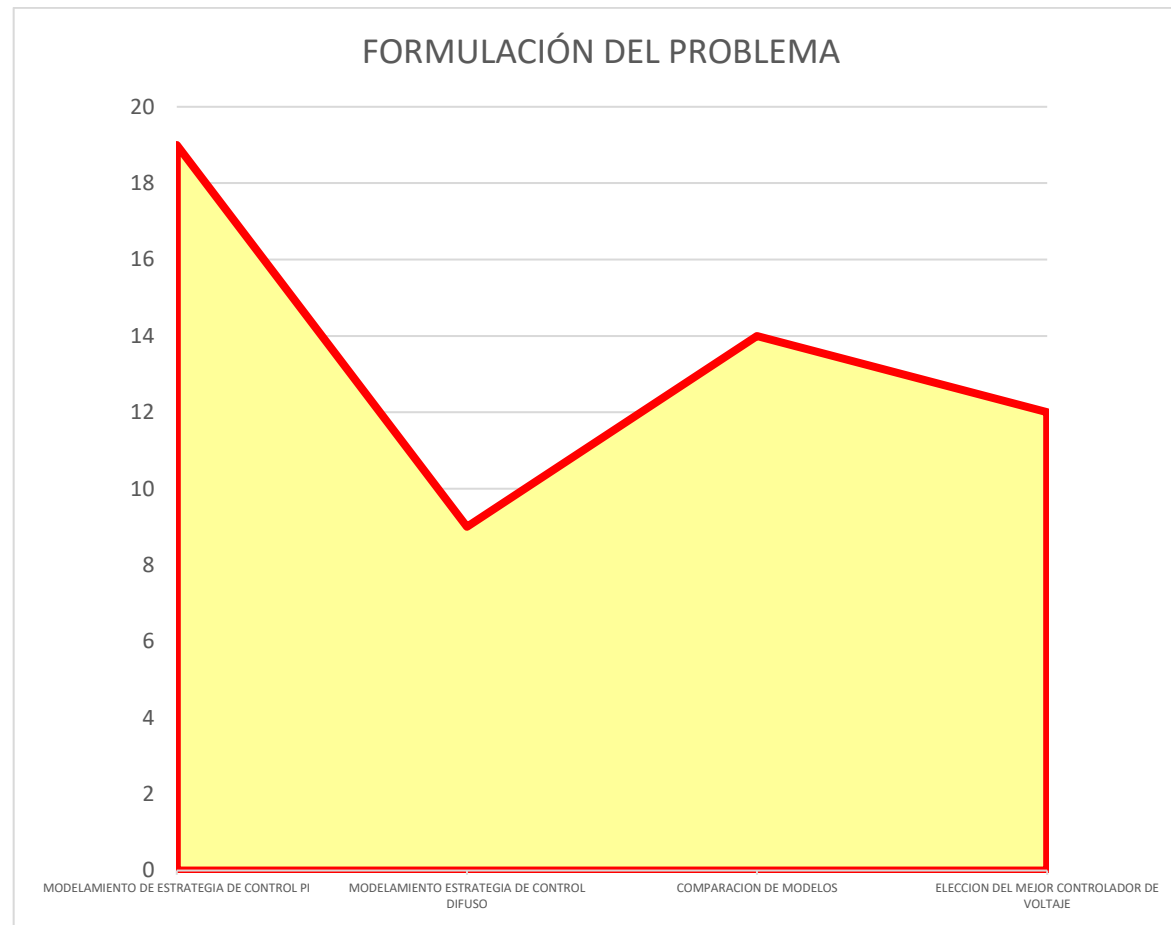


Figura 42. Indicador de formulación del problema- Estado del arte

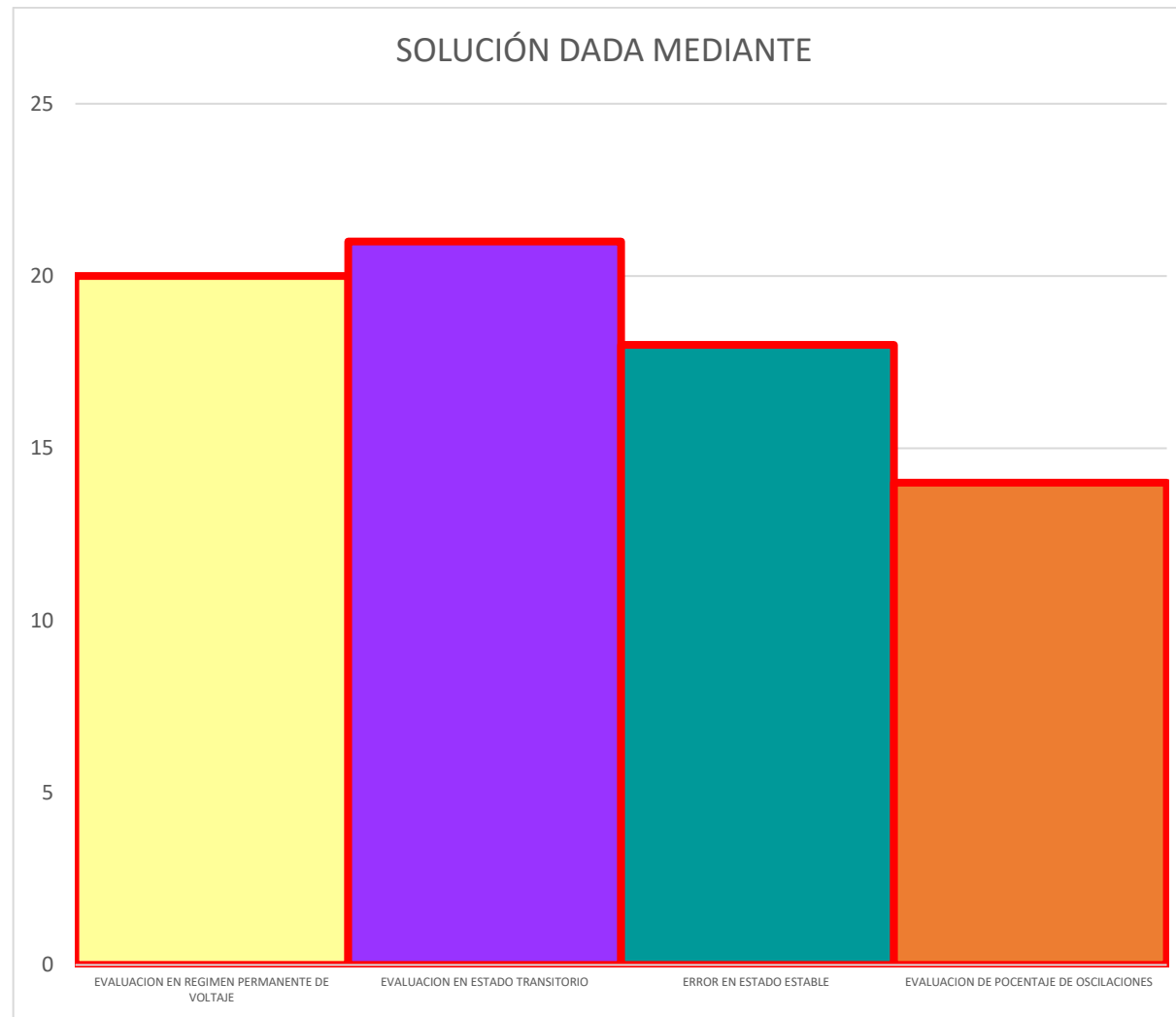


Figura 43. Indicador de solución - Estado del arte